

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНЖЕНЕРІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Методика обміну даними військовослужбовців для
оптимізації кадрових переміщень»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 121 Інженерія програмного забезпечення
освітньо-професійної програми «Інженерія програмного забезпечення»

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання
на відповідне джерело*

_____ АНТОН КОМІСАРУК
(підпис)

Виконав: здобувач вищої освіти групи ПДМ-61
АНТОН КОМІСАРУК

Керівник: Віталій ЗАЛИВА
доктор філософії (PhD)

Рецензент: _____
науковий ступінь, Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
вчене звання

Київ 2026

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

Кафедра Інженерії програмного забезпечення

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 121 Інженерія програмного забезпечення

Освітньо-професійна програма «Інженерія програмного забезпечення»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Інженерії програмного забезпечення

_____ Ірина ЗАМРІЙ

«_____» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Комісаруку Антону Володимировичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Методика обміну даними військовослужбовців для оптимізації кадрових переміщень»

керівник кваліфікаційної роботи Віталій ЗАЛИВА, доктор філософії (PhD),

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «30» жовтня 2025 р. № 467.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «19» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: науково-технічна література та нормативна база, параметри процесу кадрових переміщень, методи багатопільової оптимізації, вимоги до інтероперабельності даних.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз сучасних методів та засобів інформаційної підтримки кадрових переміщень у військовій сфері.
2. Розробка математичних моделей оптимізації розподілу ресурсів та архітектури обміну даними.

3. Експериментальне дослідження ефективності запропонованої методики на основі розробленого програмного прототипу.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*

1. Актуальність роботи.
2. Математична модель оптимізації кадрових переміщень
3. Алгоритм формування матриці сумісності
4. Практичний результат
5. Приклади створення оптимізованих логів
6. Порівняльний аналіз

6. Дата видачі завдання «31» жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз наявної науково-технічної літератури	31.10 – 02.11.2025	
2	Вивчення матеріалів та аналіз існуючих систем управління кадрами в оборонній сфері	03.11 – 05.11.2025	
3	Дослідження методів багатоцільової оптимізації та стандартів безпеки даних	06.11 – 09.11.2025	
4	Розробка математичної моделі розподілу ресурсів та методики безпечного обміну даними	10.11 – 16.11.2025	
5	Програмна реалізація прототипу системи для автоматизації кадрових переміщень	17.11 – 23.11.2025	
6	Експериментальне дослідження ефективності запропонованої методики та аналіз результатів	24.11 – 30.11.2025	
7	Оформлення роботи: вступ, висновки, реферат	30.11 – 09.12.2025	
8	Розробка демонстраційних матеріалів	09.12 – 19.12.2025	

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Антон КОМІСАРУК

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ (підпис)

Віталій ЗАЛИВА

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 93 стор., 5 табл., 5 рис., 43 джерел.

Мета роботи – підвищення ефективності процесу кадрових переміщень військовослужбовців за рахунок розробки та застосування методики інтегрованого обміну даними, що базується на моделях оптимізації та принципах стандартизації даних.

Об'єкт дослідження – процес обміну даними та підтримки прийняття рішень при кадрових переміщеннях військовослужбовців.

Предмет дослідження – методика обміну даними, а також моделі оптимізації та технології обміну, що забезпечують її функціонування.

У роботі було розроблено методику інтегрованого обміну даними військовослужбовців для оптимізації кадрових переміщень на основі методів багатоцільової оптимізації. Розробка враховує основні проблеми функціонування існуючих кадрових механізмів, зокрема, фрагментацію даних між різними підрозділами, низьку оперативність прийняття рішень та ризики витоку чутливої інформації при використанні незахищених каналів. Особливу увагу в дослідженні приділено формалізації критеріїв професійної відповідності та побудові математичної моделі, яка дозволяє знаходити баланс між потребами підрозділів і наявним кадровим ресурсом, мінімізуючи при цьому логістичні та часові витрати, а також усуваючи суб'єктивний фактор при прийнятті рішень.

Оптимізацію переміщень реалізовано шляхом вирішення задачі про призначення з урахуванням багатофакторних критеріїв: відповідності навичок, рангу та досвіду. Для моделювання процесу розроблено програмний прототип, який використовує стандартизовані профілі для забезпечення інтеоперабельності систем та базується на принципах архітектури нульової довіри Zero Trust. Реалізований підхід дозволяє інтегрувати гетерогенні інформаційні системи без необхідності їх повної заміни, забезпечуючи надійний обмін даними через

API-шлюзи. Аналіз результатів імітаційного моделювання показав ефективність розробленої методики, продемонструвавши скорочення часу на ротацію та підвищення точності кваліфікаційної відповідності. Практичне застосування отриманих результатів сприяє цифровізації процесів військового управління та підвищенню загальної боєздатності підрозділів завдяки швидкому та якісному доукомплектуванню фахівцями необхідного профілю.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КАДРОВІ ПЕРЕМІЩЕННЯ, БАГАТОЦІЛЬОВА ОПТИМІЗАЦІЯ, ОБМІН ДАНИМИ, ZERO TRUST, ЗАДАЧА ПРО ПРИЗНАЧЕННЯ, ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНІСТЬ.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 93 pages, 5 pictures, 5 tables, 43 sources.

The purpose of the work is to improve the efficiency of the process of personnel transfers of military personnel through the development and application of an integrated data exchange methodology based on optimization models and data standardization principles.

The object of research – is the process of data exchange and decision support in personnel transfers of military personnel.

The subject of research – is the data exchange methodology, as well as the optimization models and exchange technologies that ensure its functioning.

The work developed a methodology for the integrated exchange of military personnel data to optimize personnel transfers based on multi-objective optimization methods. The development takes into account the main problems of the functioning of existing personnel mechanisms, in particular, data fragmentation between different departments, low efficiency of decision-making, and the risks of sensitive information leakage when using unprotected channels. The study pays particular attention to the formalization of professional suitability criteria and the construction of a mathematical model that allows a balance to be found between the needs of departments and available personnel resources, while minimizing logistics and time costs and eliminating the subjective factor in decision-making.

The optimization of movements is implemented by solving the assignment problem, taking into account multifactorial criteria: skills, rank, and experience. A software prototype has been developed to model the process, which uses standardized profiles to ensure system interoperability and is based on the principles of Zero Trust architecture. The implemented approach allows the integration of heterogeneous information systems without the need for their complete replacement, ensuring reliable data exchange through API gateways. Analysis of the simulation modeling results

showed the effectiveness of the developed methodology, demonstrating a reduction in rotation time and an increase in the accuracy of qualification compliance. The practical application of the results obtained contributes to the digitalization of military management processes and increases the overall combat capability of units through the rapid and high-quality replenishment of specialists with the necessary profiles.

KEYWORDS: PERSONNEL TRANSFERS, MULTIPLE-OBJECTIVE OPTIMIZATION, DATA EXCHANGE, ZERO TRUST, ASSIGNMENT PROBLEM, INTEROPERABILITY.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	13
1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТА АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ОБМІНУ ДАНИМИ ВІЙСЬКОВОСЛУЖБОВЦІВ У СИСТЕМАХ КАДРОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	16
1.1 Огляд літературних джерел та еволюція підходів до обміну інформацією у військовій сфері.....	16
1.1.1 Стратегічні підходи до управління даними: аналіз міжнародного досвіду.....	17
1.1.2 Аналіз існуючих фреймворків та програм обміну даними.....	19
1.1.3 Виклики інтеперабельності та людський фактор.....	21
1.2 Аналіз існуючих рішень та інформаційних технологій в Україні та світі.....	22
1.2.1 Зарубіжний досвід та системи управління персоналом.....	23
1.2.2 Математичні методи та алгоритми оптимізації.....	24
1.2.3 Архітектурні підходи: Centralized vs. Data Mesh.....	25
1.3 Виявлення недоліків та проблемних питань.....	27
1.3.1 Проблеми безпеки та захисту інформації.....	27
1.3.2 Відсутність механізмів автоматизованої оптимізації.....	28
2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ІНТЕГРОВАНОГО ОБМІНУ КАДРОВИМИ ДАНИМИ В СИСТЕМАХ ВІЙСЬКОВОГО УПРАВЛІННЯ.....	29
2.1 Методологічні засади дослідження та аналіз парадигми обміну даними.....	29
2.1.1 Методи математичного моделювання та оптимізації.....	31
2.1.2 Методи забезпечення інформаційної безпеки та приватності.....	32
2.2 Побудова комплексної математичної моделі оптимізації кадрових переміщень.....	33

2.2.1 Цільова функція.....	34
2.2.2 Система обмежень та стохастичні фактори.....	35
2.3 Аналіз критичних параметрів методики обміну даними.....	36
2.3.1 Латентність та актуальність даних.....	37
2.3.2 Надійність, цілісність та захищеність.....	38
2.4 Архітектура системи обміну даними.....	38
2.4.1 Система підтримки прийняття рішень.....	40
2.5 Обґрунтування достовірності та ефективності запропонованої методики.....	40
2.5.1 Порівняльний аналіз ефективності.....	41
2.5.2 Оцінка безпеки та відповідність стандартам.....	41
2.6 Тестування та верифікація алгоритму.....	43
2.6.1 Адаптація стандарту ISO/IEC/IEEE 29119 до військових кадрових систем.....	44
2.6.2 Документування процесу верифікації.....	46
2.7 Комплексна стратегія тестування програмної реалізації.....	46
2.8 Методологія перевірки та валідації MILP моделей.....	50
2.9 Валідація математичних функцій та метрики якості.....	52
2.9.1 Метрики якості програмного забезпечення.....	52
2.9.2 Метрики оцінки якості алгоритму розподілу.....	55
3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МЕТОДИКИ В УМОВАХ КАДРОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ.....	56
3.1 Методологія проведення експерименту та характеристика синтетичного середовища.....	56
3.1.1 Архітектура експериментального стенду та сценарії тестування...	57
3.2 Кількісний аналіз операційної ефективності: теорія черг та пропускна здатність.....	58
3.2.1 Порівняльний аналіз часових характеристик.....	59
3.2.2 Аналіз точності даних та мінімізація помилок.....	60

3.3 Математична оптимізація кадрових переміщень: від евристики до MILP.....	61
3.3.1 Результати порівняльного аналізу алгоритмів.....	62
3.3.2 Комплексна оцінка за функцією бажаності Харрінгтона.....	64
3.4 Оцінка інтегрованих та безпеки: системний підхід.....	65
3.4.1 Аналіз безпеки та архітектура нульової довіри.....	66
3.5 Практичні рекомендації щодо впровадження та масштабування.....	66
3.5.1 Розвиток людського капіталу.....	67
3.6 Архітектурні принципи технологічного стеку.....	68
3.6.1 Модуль обробки та агрегації даних.....	69
3.6.2 Процеси ETL та очищення даних.....	70
3.6.3 Модуль мережевого моделювання та логістики.....	72
3.6.4 Модуль оптимізації.....	73
3.6.5 Алгоритм розв'язання.....	74
3.6.6 Аналітичний модуль та візуалізація.....	75
3.6.7 Реалізація принципів VAULTIS.....	77
ВИСНОВКИ.....	79
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	81
ДОДАТОК А. ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....	86
ДОДАТОК Б. ЛІСТИНГИ ПРОГРАМНИХ МОДУЛІВ.....	91

ВСТУП

В умовах сучасних військових конфліктів ефективність управління оборонними ресурсами безпосередньо залежить від швидкості та якості прийняття рішень. За даними роботи [1], критично важливим активом збройних сил є людський капітал, а оперативність його розподілу між підрозділами часто визначає успіх виконання бойових завдань. Цифровізація процесів управління персоналом дозволяє значно пришвидшити обмін інформацією та підвищити прозорість обліку.

Однак, як зазначається в дослідженні [2], існуючі інформаційні системи військового призначення часто функціонують ізольовано, створюючи проблему фрагментації даних («інформаційні колодязі»). Традиційні методи кадрових переміщень, що базуються на паперовому документообігу або несумісних базах даних, не забезпечують необхідної оперативності та не гарантують безпеку чутливої інформації при її передачі. У зв'язку з цим виникає нагальна потреба у створенні захищеної методики обміну даними, яка здатна інтегрувати розрізнені системи та автоматизувати процес підбору кадрів. Зокрема, використання методів багатоцільової оптимізації, згідно з даними роботи [3], є ефективним інструментом для підвищення якості комплектування підрозділів, дозволяючи враховувати як професійні навички військовослужбовців, так і логістичні обмеження.

Об'єкт дослідження – процес інформаційної підтримки та управління кадровими переміщеннями військовослужбовців.

Предмет дослідження – методика, математичні моделі та засоби безпечного обміну даними для оптимізації кадрових переміщень у військових структурах.

Мета роботи – підвищення ефективності та оперативності процесів комплектування підрозділів шляхом розробки методики обміну даними, що забезпечує оптимізацію кадрових переміщень та захист інформації на основі сучасних стандартів інтероперабельності.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено вирішення наступних завдань:

1. Провести аналіз існуючих підходів до управління кадровими ресурсами в оборонній сфері та виявити проблеми обміну даними в умовах гетерогенних інформаційних систем.
2. Дослідити особливості використання методів математичної оптимізації («задача про призначення») та архітектурних принципів кібербезпеки (Zero Trust) для вирішення задач ротації персоналу.
3. Розробити методику обміну даними військовослужбовців, що включає уніфіковані протоколи передачі інформації та модель багатоцільової оптимізації переміщень.
4. Розробити програмну реалізацію (прототип) системи для автоматизованого підбору кандидатів та захищеного обміну їхніми профілями згідно з розробленою методикою.
5. Провести аналіз результатів впровадження методики, оцінити її ефективність за критеріями часу, відповідності навичок та надійності захисту даних.

Методи дослідження – системний аналіз для визначення вимог до системи, методи теорії дослідження операцій (для вирішення оптимізаційних задач), методи інженерії програмного забезпечення (для проектування API та схем даних), а також імітаційне моделювання для перевірки ефективності запропонованих алгоритмів.

Практична значущість результатів – результати дослідження можуть бути використані кадровими органами оборонного сектору для автоматизації процесів ротації. Запропонована методика дозволяє скоротити час на прийняття кадрових рішень, підвищити точність відповідності навичок військовослужбовців займаним посадам та забезпечити високий рівень захисту персональних даних при міжвідомчій взаємодії. Це сприяє підвищенню загальної боєздатності підрозділів та оптимізації адміністративних ресурсів.

Робота пройшла апробацію на науково-практичних конференціях:

1. Науково-практична конференція «Актуальні проблеми кібербезпеки».
2. Науково-технічна конференція «Виклики та рішення в програм інженерії».

За результатами апробації опубліковано тези доповідей [4] та [5].

Робота складається з вступу, трьох розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі проводиться огляд сучасного стану систем кадрового забезпечення, аналіз нормативної бази та проблем інтеперабельності військових систем. Другий розділ присвячений обґрунтуванню методів дослідження, розробці математичної моделі оптимізації переміщень та архітектури безпечного обміну даними. Третій розділ присвячений опису програмної реалізації компонентів методики, проведенню експериментального дослідження та аналізу отриманих результатів ефективності.

1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТА АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ОБМІНУ ДАНИМИ ВІЙСЬКОВОСЛУЖБОВЦІВ У СИСТЕМАХ КАДРОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

1.1. Огляд літературних джерел та еволюція підходів до обміну інформацією у військовій сфері

Сучасне військове протистояння характеризується не лише боротьбою озброєнь, а й змаганням швидкостей управлінських циклів. У цьому контексті управління людським капіталом перетворюється на критичний фактор обороноздатності держави. Ефективність збройних сил безпосередньо залежить від здатності командування оперативно оперувати даними про особовий склад, здійснювати ротації, комплектувати підрозділи фахівцями необхідної кваліфікації та прогнозувати кадрові потреби. Аналіз наукової літератури, нормативно-правових актів та стратегічних документів провідних країн світу свідчить про зміну парадигми від паперового обліку до дата-центричних екосистем.[6]

У сучасних умовах активного ведення бойових дій та частоті ротації особового складу особливої актуальності набуває проблема ефективного обміну інформацією про військовослужбовців між різними підрозділами.¹ Запровадження єдиної методики обміну структурованими даними дозволяє не лише прискорити процес кадрового переміщення, а й надати командирам оперативний доступ до історії служби військовослужбовця, що сприяє ухваленню обґрунтованих рішень.

1.1.1. Стратегічні підходи до управління даними: аналіз міжнародного досвіду

Розвинуті системи обміну інформацією на основі єдиних стандартів дозволяють оптимізувати прийняття кадрових рішень та уніфікувати рух військових кадрів між підрозділами. Фактично всі дослідження відзначають необхідність уніфікації даних, впровадження єдиних інформаційних систем та дотримання міжнародних стандартів обміну. Для розуміння архітектури майбутньої системи необхідний глибокий аналіз існуючих стратегій, зокрема досвіду Сполучених Штатів та НАТО.

Стратегія даних Міністерства оборони США (U.S. Department of Defense Data Strategy) визначає візію перетворення оборонного відомства на організацію, орієнтовану на дані (data-centric organization). Ключовим елементом цієї стратегії є набір керівних принципів VAULTIS, які є фундаментом для будь-якої сучасної військової інформаційної системи. Кожен компонент цієї аббревіатури має безпосереднє відношення до проектування системи кадрових переміщень. На рисунку 1.1 можна наглядно принципи.

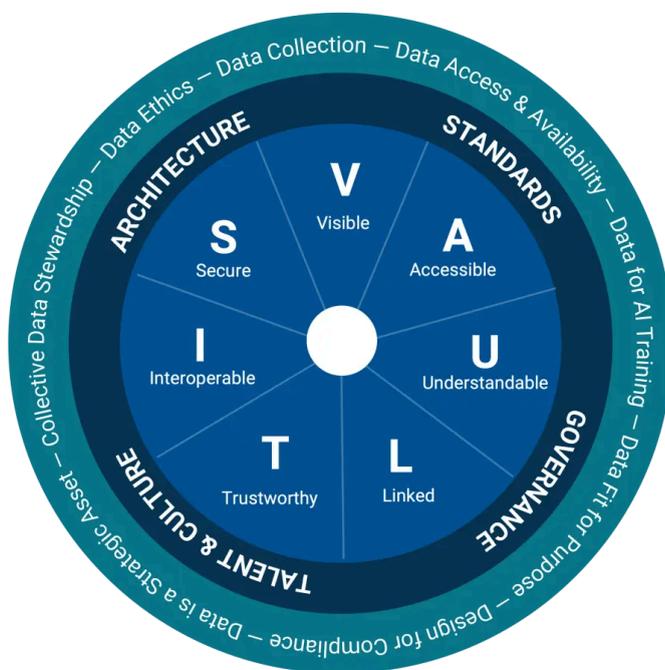


Рис. 1.1. Візуалізація принципів VAULTIS

Таблиця 1.1.

Характеристика принципів VAULTIS у контексті кадрового менеджменту

Принцип	Зміст вимоги до системи кадрових переміщень
Visible	Дані про наявність, статус та кваліфікацію військовослужбовця мають бути видимими для авторизованих користувачів у реальному часі, незалежно від місця дислокації.
Accessible	Інформація повинна бути доступною через стандартизовані інтерфейси (API), що дозволяє інтегрувати кадрові дані з медичними, логістичними та фінансовими системами.
Understandable	Дані повинні мати уніфіковану семантику, метадані та словники, щоб уникнути різночитань (наприклад, коди військово-облікових спеціальностей мають бути єдиними).
Linked	Кадровий запис має бути пов'язаний з іншими доменами даних (історія виплат, бойовий досвід, поранення) для створення цілісного профілю (Global Force Management Data Initiative).
Trusted	Дані повинні бути точними, незмінними (integrity) та походити з перевірених джерел. Користувачі повинні довіряти системі як "єдиному джерелу істини".
Interoperable	Система повинна забезпечувати обмін даними між видами збройних сил та союзниками, використовуючи відкриті стандарти та архітектури.
Secure	Дані повинні бути захищені від несанкціонованого доступу, витоку та маніпуляцій на всіх етапах життєвого циклу (збір, передача, зберігання).

Аналіз стратегії DoD показує, що дані розглядаються як стратегічний актив, рівнозначний системам озброєння. Цей підхід вимагає фундаментальної зміни в культурі управління: перехід від володіння даними окремими підрозділами до колективного управління даними в інтересах усієї організації.[7]

Паралельно з американським досвідом, Політика НАТО щодо експлуатації даних (NATO's Data Exploitation Framework Policy - DEFP) визначає бачення досягнення інформаційної переваги та прийняття рішень на основі даних на всіх рівнях через безпечний та надійний обмін даними. Політика DEFP підкреслює стратегічну важливість використання та обміну даними в рамках багатонаціонального альянсу. Для України, яка прагне інтеграції в євроатлантичні структури, критично важливим є врахування вимог DEFP при розробці національних методик, зокрема щодо сумісності форматів даних про особовий склад.

1.1.2 Аналіз існуючих фреймворків та програм обміну даними

Військова сфера характеризується наявністю різноманітних програм та ініціатив, спрямованих на обмін даними, кожна з яких має свої особливості та цілі. Аналіз цих систем дозволяє виділити патерни проектування, застосовні до кадрових систем.

Програма GIDEP (Government-Industry Data Exchange Program), створена у 1958 році, є кооперативним форумом для обміну технічною інформацією між урядовими та промисловими учасниками. Хоча GIDEP фокусується на технічних даних (деталі, матеріали, процеси), її архітектура, що базується на централізованому репозиторії та обов'язковій звітності учасників, демонструє можливість ефективного формального обміну даними в оборонному секторі. Успіх GIDEP, яка функціонує десятиліттями, доводить, що стандартизація та зменшення дублювання є досяжними цілями. Проте, несекретний характер GIDEP обмежує пряме перенесення її механізмів на обмін чутливими персональними даними військовослужбовців, які потребують значно суворіших протоколів безпеки.

Приклад структури GIDEP можна побачити на рисунку 1.2.

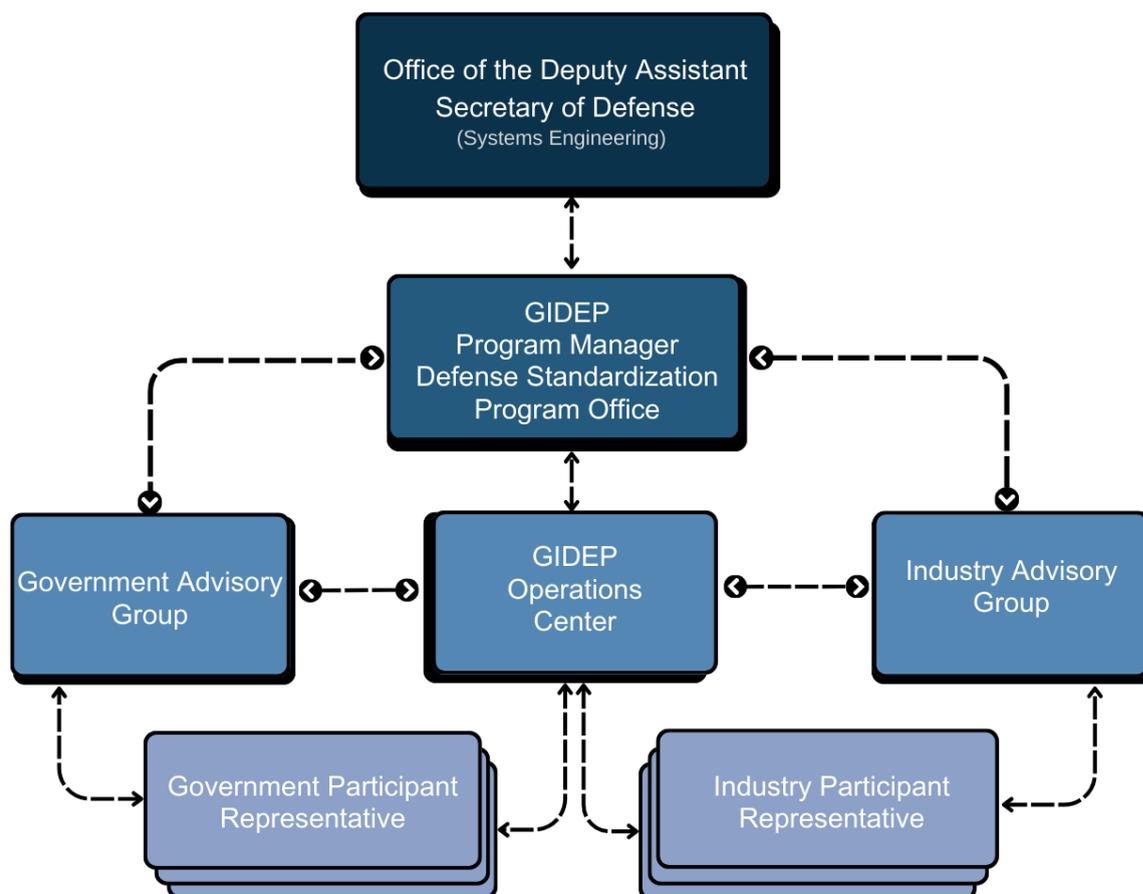


Рис. 1.2 Структура GIDEP

Система CIDNE (Combined Information Data Network Exchange) представляє інший клас систем — це інструмент оперативного звітування, що використовувався командуванням US CENTCOM в Афганістані та Іраку. CIDNE стала первинним джерелом даних для майже всієї інформації, офіційно представленої Конгресу та Білому дому. Ключовим уроком CIDNE є важливість гнучкості та оперативності розробки: система була створена у відповідь на усвідомлення того, що традиційні цикли закупівлі ПЗ не відповідають динаміці бойових дій. У контексті кадрових переміщень досвід CIDNE показує, як децентралізований ввід даних на тактичному рівні (reports from the field) може сформувати стратегічну картину для вищого командування.

Сучасним прикладом міжнародної співпраці є ініціатива AUKUS Electronic Warfare (EW) Intel Sharing Framework, яка має на меті визначити протоколи обміну

даними радіоелектронної боротьби між США, Австралією та Великою Британією. Фреймворк AUKUS зосереджений на інтероперабельності систем в умовах протидії в електромагнітному спектрі. Це демонструє модель безпечного обміну даними між довіреними партнерами (Trusted Partners) у специфічній, високочутливій предметній області. Для кадрової системи це означає необхідність розробки механізмів федеративного обміну даними, де різні відомства або країни-партнери можуть обмінюватися інформацією про персонал (наприклад, при спільному навчанні) без компрометації національних баз даних.[8]

1.1.3 Виклики інтероперабельності та людський фактор

Досягнення безперешкодного обміну даними та справжньої інтероперабельності між різноманітними, часто застарілими системами у військових організаціях є складним завданням. Існують різні технічні, процедурні та людські фактори, які значно впливають на можливість досягнення ефективної інтероперабельності даних.

Технічні бар'єри:

- відсутність стандартизованих API: більшість успадкованих (legacy) систем не мають документованих інтерфейсів для зовнішньої взаємодії, що призводить до створення "точкових" інтеграцій (point-to-point integration), які складно підтримувати.
- гетерогенність форматів даних: різні підрозділи можуть використовувати несумісні формати зберігання даних (від Excel-таблиць до реляційних БД Oracle або PostgreSQL), що вимагає складних процедур ETL (Extract, Transform, Load) для їх консолідації.
- інтеграція legacy-систем: швидкий темп технологічного прогресу випереджає здатність військових інтегрувати нові системи, що призводить до поєднання застарілих та передових технологій, які зазнають труднощів у ефективному зв'язку.

Процедурні та організаційні фактори:

- відсутність узгоджених політик: часто відсутня єдина концепція процедурної

інтероперабельності (наприклад, ТТП – тактика, техніка та процедури), що регулює, хто, коли і як має право вносити зміни в дані про військовослужбовця.

- різні рівні класифікації: протоколи безпеки та рівні доступу до державної таємниці варіюються між відомствами, що створює штучні бар'єри для обміну інформацією навіть у межах одного міністерства.

Людський фактор:

Літературні джерела підкреслюють, що технології самі по собі не вирішують проблему. Необхідний культурний перехід до прийняття рішень на основі даних. До людських факторів належать потенційний опір змінам ("паперова стабільність"), необхідність навчання персоналу та формування обізнаних у даних сил (data-literate force), здатних розуміти та використовувати аналітику. Будівництво довіри та сприяння співпраці через навчання є критично важливими для успішної інтероперабельності.[9-10]

1.2 Аналіз існуючих рішень та інформаційних технологій в Україні та світі

В Україні в умовах повномасштабної війни відбувається стрімка цифрова трансформація Збройних Сил, яка докорінно змінює підходи до кадрового менеджменту. Впровадження новітніх технологій, таких як екосистема «Армія+» та інші цифрові продукти, спрямоване на підвищення ефективності та оперативної спроможності війська.

Єдиний державний реєстр призовників, військовозобов'язаних та резервістів «Оберіг».Ця система є фундаментом військового обліку. Згідно з даними Міністерства оборони, «Оберіг» забезпечує цифровізацію процесів мобілізації, зменшує корупційні ризики та дозволяє верифікувати дані через інтеграцію з іншими державними реєстрами. Проте, основний фокус реєстру зміщений на мобілізаційний ресурс, тоді як функціонал управління кар'єрою діючих військовослужбовців (Talent Management) потребує подальшого розвитку.

Екосистема «Армія+» позиціонується як інструмент дебюрократизації армії. Впровадження електронних рапортів (ArmyID) є революційним кроком для оптимізації кадрових переміщень. Замість паперового рапорту, який міг "губитися" тижнями, військовослужбовець може ініціювати процес переведення або відпустки через захищений застосунок. Це значно скорочує цикл прийняття рішень та підвищує прозорість процесів. [11]

Система ситуаційної обізнаності «DELTA» хоча першочергово є системою управління боєм (BMS), її мережево-центрична архітектура та відповідність стандартам НАТО роблять її важливим елементом загальної екосистеми. Інтеграція кадрових даних у DELTA дозволяє командирам бачити не просто умовні знаки підрозділів, а й реальну укомплектованість особовим складом, його втому та бойовий досвід.

Мобільний застосунок «Резерв+» спрямований на актуалізацію даних військовозобов'язаних, що є першим етапом у ланцюжку кадрового забезпечення. Актуальність даних, зібраних через цей інструмент, безпосередньо впливає на якість комплектування підрозділів. Незважаючи на прогрес, існують значні виклики. Системи часто функціонують відокремлено, а процеси обміну даними між ними (наприклад, між «Оберіг» та кадровими органами частин) не завжди автоматизовані. "Паперова армія" залишається реальністю: паралельне ведення паперових журналів та стройових записок створює подвійне навантаження на персонал та ризики розсинхронізації даних.

1.2.1 Зарубіжний досвід та системи управління персоналом

Для порівняння доцільно розглянути досвід армій країн НАТО. Наприклад, Армія США використовує інтегровану систему IPPS-A (Integrated Personnel and Pay System - Army), яка об'єднує кадрові та фінансові дані. Це дозволяє уникнути ситуацій, коли військовослужбовець переміщений до іншої частини, але продовжує числитися у списках попередньої для нарахування грошового забезпечення. Модель кадрового менеджменту IPPS-A можна побачити на рисунку 1.3.

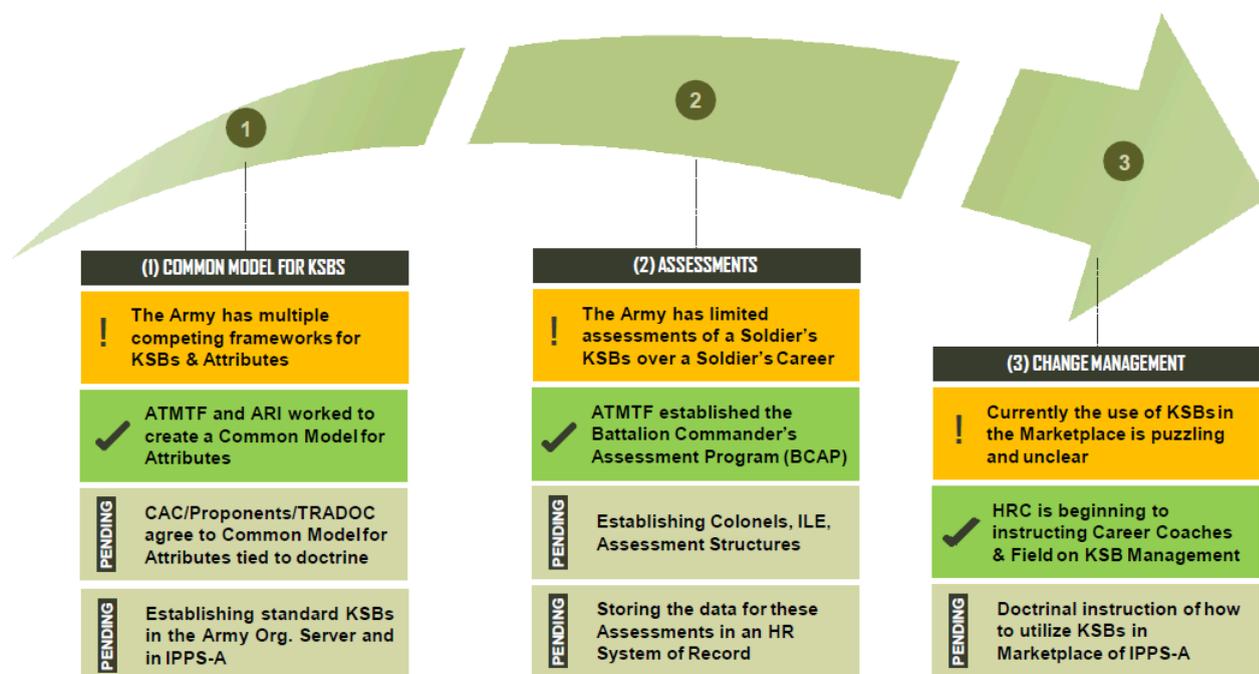


Рис 1.3 Модель управління кадрами IPPS-A

Французька армія також активно використовує дані для оптимізації переміщення персоналу, централізуючи інформацію та використовуючи системи підтримки прийняття рішень (СППР). Використання підходів, що базуються на даних (data-driven), дозволяє їм прогнозувати кадрові розриви та планувати ротації на стратегічному рівні.

1.2.2 Математичні методи та алгоритми оптимізації

Важливою складовою аналізу існуючих рішень є розгляд алгоритмічного забезпечення. Простого збору даних недостатньо; для оптимізації переміщень необхідні математичні моделі. У науковій літературі для вирішення задач розподілу персоналу (Assignment Problem) пропонуються наступні методи:

- лінійне програмування (Linear Programming) та змішане цілочисельне лінійне програмування (MILP) дозволяють знайти оптимальний розподіл кандидатів на вакантні посади, максимізуючи загальну цільову функцію (наприклад, боєготовність) при дотриманні жорстких обмежень (штатний розпис, ВОС, звання).
- генетичні алгоритми (Genetic Algorithms) ефективні для задач великої

розмірності з нелінійними залежностями, де класичні методи можуть бути занадто ресурсомісткими. Вони дозволяють знаходити субоптимальні, але прийнятні рішення за обмежений час.

- алгоритм стабільного шлюбу (Stable Marriage Algorithm) може бути адаптований для двостороннього узгодження інтересів: командирів (які шукають конкретні навички) та військовослужбовців (які мають переваги щодо місця служби).
- мережеві моделі оптимізації використовуються для моделювання потоків персоналу між підрозділами як потоків у графі, що дозволяє оптимізувати логістику переміщень.

Аналіз показує, що хоча математичний апарат добре розвинений, його практична імплементація в українських військових системах знаходиться на початковому етапі. Більшість рішень фокусуються на обліку (record keeping), а не на оптимізації (optimization).[12]

1.2.3 Архітектурні підходи: Centralized vs. Data Mesh

Традиційні підходи до побудови військових систем базувалися на монолітних архітектурах та централізованих сховищах даних (Data Warehouses). Однак, в умовах сучасної війни, такий підхід має недоліки: єдина точка відмови та низька гнучкість.

Сучасні дослідження пропонують перехід до більш гнучких архітектур, таких як Data Lake та Data Mesh.

Data Lake або ж Lakehouse забезпечує зберігання великих обсягів структурованих та неструктурованих даних з вбудованими механізмами безпеки. Це дозволяє проводити глибоку аналітику та використовувати AI/ML. Структуру Data Lake можна побачити на рисунку 1.4.

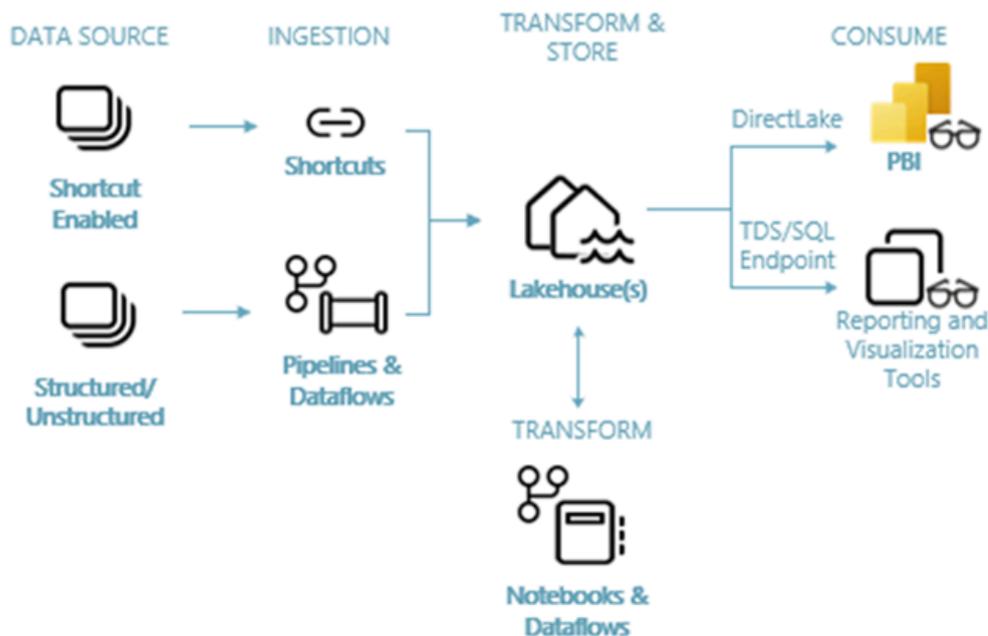


Рис. 1.4 Структура Data Lake

Data Mesh надає децентралізований підхід, де дані розглядаються як продукт, що належить певному домену (наприклад, домен "Медицина", домен "Кадри", домен "Логістика"). Це підвищує стійкість системи та швидкість доступу до даних, зменшуючи залежність від центральної команди інженерів даних. В умовах військових дій, коли зв'язок з центром може бути втрачено, архітектура Data Mesh може забезпечити автономність роботи локальних вузлів. Загальну структуру Data Mesh можна побачити на рисунку 1.5.

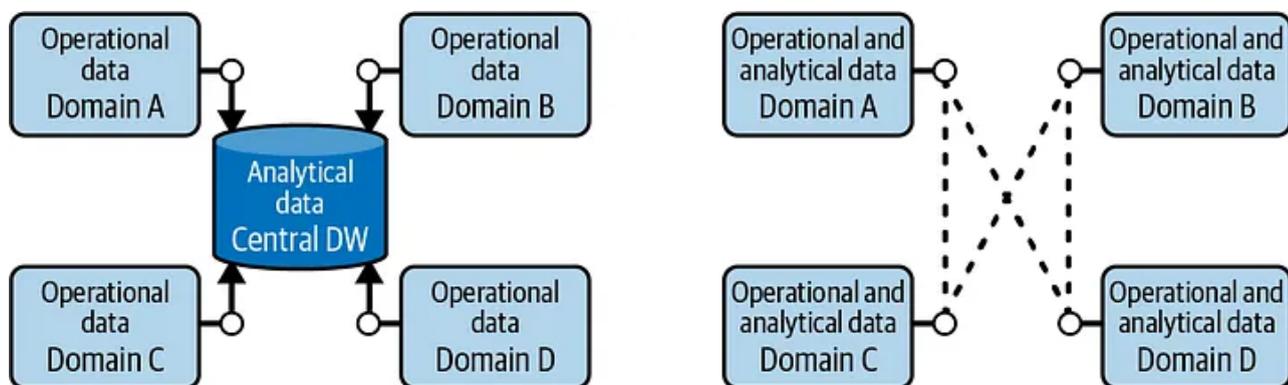


Рис. 1.5. Структура Data Mesh

1.3 Виявлення недоліків та проблемних питань

Фрагментація та "клаптикова" автоматизація: Найвні методи обліку часто засновані на ізольованих інформаційних системах або паперовій документації. Відсутність наскрізної інтеграції призводить до того, що інформація про переміщення військовослужбовця передається повільніше, ніж відбувається саме фізичне переміщення. Це створює колізії, коли військовий прибув до частини, але не може бути поставлений на забезпечення через відсутність наказу в базі.

Низька якість та неактуальність даних: "Паперові" процеси та ручне введення даних призводять до помилок та затримок. Неактуальність інформації в ТЦК та СП, некоректне відображення даних у застосунках підривають довіру до цифрових систем.

Дублювання інформації: Військові частини змушені подавати одні й ті самі дані в різні інстанції у різних форматах, що призводить до нераціонального використання часу офіцерів кадрових органів.[13]

1.3.1 Проблеми безпеки та захисту інформації

Цифровізація значно розширює поверхню атаки для ворога. Військові дані є стратегічною ціллю; їх витік або спотворення може мати катастрофічні наслідки для національної безпеки. Ризики централізації: Зберігання всіх даних в одному місці створює ризик знищення або компрометації всього масиву даних однією успішною кібератакою. Безпека кінцевих точок: Використання мобільних застосунків ("Армія+", "Резерв+") на особистих пристроях військовослужбовців вимагає впровадження суворих політик безпеки (Zero Trust, MFA), оскільки такі пристрої можуть бути скомпрометовані або захоплені ворогом. Інтероперабельність: Несумісність національних протоколів безпеки зі стандартами НАТО ускладнює створення спільних інформаційних просторів.

1.3.2 Відсутність механізмів автоматизованої оптимізації

Існуючі системи переважно фіксують факти (системи обліку), але не пропонують рішень. Командири та кадрові органи приймають рішення про переміщення на основі обмеженої інформації та власної інтуїції, без використання математичного моделювання, яке могло б врахувати тисячі параметрів та обмежень. Відсутність модулів СППР (систем підтримки прийняття рішень) є суттєвим технологічним розривом. Порівняння відповідності завдань дослідження можна побачити в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Відповідність завдань дослідження виявленим проблемам

Виявлена проблема	Завдання дослідження	Очікуваний результат
Фрагментація даних та "silos"	Проектування методики та архітектури	Створення єдиного інформаційного простору та забезпечення інтероперабельності через API.
Суб'єктивність рішень, відсутність оптимізації	Розробка алгоритмічного забезпечення	Впровадження математично обґрунтованих рекомендацій для кадрових переміщень.
Ризики кібербезпеки та витоку даних	Забезпечення безпеки даних	Мінімізація ризиків через шифрування та Zero Trust архітектуру.
Бюрократичні затримки ("паперова армія")	Розробка програмного прототипу	Автоматизація рутинних операцій та перехід на електронний документообіг (рапорти).

Наявні дослідження свідчать про те, що розробка методики обміну даними є не просто технічним завданням, а комплексною проблемою, що вимагає системного підходу, який враховує організаційні, алгоритмічні та безпекові аспекти.

2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ІНТЕГРОВАНОГО ОБМІНУ КАДРОВИМИ ДАНИМИ В СИСТЕМАХ ВІЙСЬКОВОГО УПРАВЛІННЯ

2.1 Методологічні засади дослідження та аналіз парадигми обміну даними

Розробка методики обміну даними військовослужбовців для оптимізації кадрових переміщень в умовах сучасного театру бойових дій вимагає фундаментального переосмислення підходів до управління інформаційними потоками. Традиційні ієрархічні моделі, що базувалися на паперовому документообігу та розрізнених, ізольованих базах даних («data silos»), продемонстрували свою неефективність в умовах динамічних змін оперативної обстановки. Специфіка об'єкту дослідження, яким є процес ротації, переміщення та комплектування особового складу, диктує необхідність переходу від документо-орієнтованої архітектури до дата-центричної моделі (Data-Centric Security). Цей перехід є не просто технологічним оновленням, а зміною філософії управління, де дані розглядаються як стратегічний актив, критично важливий для досягнення переваги у прийнятті рішень (Decision Superiority).[14]

В основі запропонованої методики лежить системний підхід, який розглядає систему кадрового забезпечення Збройних Сил не як набір статичних реєстрів, а як складну, адаптивну кібер-фізичну систему з великою кількістю стохастичних взаємозв'язків. Обмін даними в такій системі не може бути лінійним; він повинен забезпечувати багатовимірну взаємодію між різними рівнями командування (стратегічним, оперативним, тактичним) та функціональними доменами (кадри, медицина, логістика, фінанси). Аналіз наукових джерел та практик країн-партнерів свідчить, що ефективність управління ресурсами безпосередньо залежить від рівня

інтероперабельності інформаційних систем. Згідно зі стратегією Міністерства оборони США (DoD Data Strategy), яку доцільно адаптувати до українських реалій, дані повинні відповідати принципам VAULTIS: вони мають бути Видимими (Visible), Доступними (Accessible), Зрозумілими (Understandable), Пов'язаними (Linked), Достовірними (Trusted), Інтероперабельними (Interoperable) та Безпечними (Secure). Застосування цих принципів у розробці методики дозволяє вирішити проблему «клаптикової» автоматизації, коли використання різних форматів даних у суміжних підрозділах призводить до необхідності ручної конвертації, втрати часу та виникнення помилок. Особливу увагу в рамках системного підходу приділено аналізу досвіду імплементації подібних систем у країнах НАТО. Зокрема, аналіз політики НАТО щодо експлуатації даних (NATO's Data Exploitation Framework Policy - DEFP) підкреслює необхідність розгляду даних як спільного ресурсу Альянсу.

Це означає, що методика обміну даними повинна передбачати не лише внутрішню оптимізацію, але й потенційну можливість безпечного обміну інформацією з партнерами в рамках спільних місій, що вимагає суворого дотримання стандартів STANAG та використання уніфікованих протоколів обміну. Важливим аспектом методології є врахування уроків невдалих проєктів, таких як американська система DIMHRS (Defense Integrated Military Human Resources System).

Цей проєкт, який намагався об'єднати всі кадрові та платіжні функції в одну монолітну систему, зазнав невдачі через надмірну складність та неможливість адаптації до специфічних вимог різних родів військ. Враховуючи цей негативний досвід, запропонована в даній роботі методика базується на модульній архітектурі та федеративному підході до управління даними, що дозволяє зберегти гнучкість окремих підсистем при забезпеченні загальної інтероперабельності.

2.1.1 Методи математичного моделювання та оптимізації

Для вирішення задачі оптимального розподілу військовослужбовців між підрозділами та посадами обрано методи дослідження операцій, які дозволяють формалізувати процес прийняття рішень. Основу математичного апарату складає змішане цілочисельне лінійне програмування (Mixed Integer Linear Programming — MILP). Обґрунтуванням цього вибору є дискретний характер змінних (військовослужбовець може бути призначений або не призначений на конкретну посаду; дробові призначення неможливі) та наявність чітких лінійних обмежень, що визначаються штатним розписом, кваліфікаційними вимогами та нормативно-правовими актами. На відміну від простих евристичних методів або "жадібних" алгоритмів, які можуть знаходити локальні оптимуми, але не гарантують найкращого розподілу ресурсів в масштабах всієї системи, MILP дозволяє знайти глобальний оптимум. Це є критично важливим в умовах дефіциту висококваліфікованих кадрів, коли кожне призначення має бути максимально ефективним.[15]

Проте, враховуючи, що задача призначення у загальному вигляді належить до класу NP-складних задач, особливо при великих розмірностях (масштаб Збройних Сил), методика також передбачає використання метаевристичних підходів. Зокрема, для ситуацій, що вимагають швидкого перерахунку варіантів в умовах екстрених змін оперативної обстановки (наприклад, необхідність термінового доукомплектування підрозділу перед виходом на бойове завдання), пропонується використання генетичних алгоритмів. Цей підхід дозволяє знайти субоптимальне, але прийнятне рішення за обмежений час, що підтверджується практикою використання подібних моделей в арміях США та Франції для планування ротацій. Крім того, методика враховує соціально-психологічні аспекти служби. Для цього застосовуються елементи алгоритму Гейла-Шеплі (Stable Marriage Problem), адаптованого для військового контексту. Це дозволяє враховувати не лише потреби армії (попит), але й, де це можливо і не суперечить інтересам

служби, побажання самих військовослужбовців (пропозиція), що позитивно впливає на морально-психологічний стан особового складу та підвищує рівень утримання кадрів (Retention Rate).

2.1.2 Методи забезпечення інформаційної безпеки та приватності

Враховуючи, що об'єктом обміну є чутливі персональні дані військовослужбовців, розголошення яких може загрожувати їхньому життю та національній безпеці, методика безальтернативно спирається на концепцію нульової довіри (Zero Trust Architecture). Традиційний периметровий захист («фортеця з ровом») є недостатнім в умовах сучасних гібридних загроз, використання хмарних технологій та мобільних пристроїв. Методологічний вибір на користь Zero Trust обґрунтовується необхідністю постійної, динамічної верифікації кожного запиту на доступ до даних, незалежно від того, чи походить він з внутрішньої мережі, чи з зовнішнього середовища.

Це відповідає сучасним стандартам кібербезпеки, таким як NIST SP 800-207 та DoD Cyber Strategy, що вимагають реалізації принципу найменших привілеїв та мікросегментації мережі. Методика також передбачає використання передових криптографічних методів захисту (шифрування AES-256 для даних у стані спокою, TLS 1.3 для даних у русі) та суворих протоколів безпечного обміну (SFTP, HTTPS з взаємною автентифікацією mTLS). Важливим аспектом є відповідність вимогам стандарту FIPS 140-2 1 щодо криптографічних модулів.

Крім того, враховуються ризики, пов'язані з використанням хмарних обчислень та необхідністю забезпечення цифрового суверенітету, що вимагає ретельного вибору архітектури зберігання даних та механізмів контролю доступу.[16]

2.2 Побудова комплексної математичної моделі оптимізації кадрових переміщень.

Ключовим елементом розробленої методики є математична модель, що формалізує процес прийняття рішень щодо переміщення особового складу. Ця модель слугує ядром інтелектуальної системи, дозволяючи трансформувати якісні характеристики (кваліфікація, бойовий досвід, психологічна стійкість) у кількісні показники, придатні для автоматизованої обробки та оптимізації.

Для побудови моделі введемо наступні множини та змінні, що описують стан системи:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ — множина військовослужбовців, що підлягають ротації, переміщенню або знаходяться в резерві.

$U = \{u_1, u_2, \dots, u_M\}$ — множина вакантних посад у військових частинах (підрозділах), що потребують укомплектування.

$K = \{k_1, k_2, \dots, k_L\}$ — множина компетенцій, яка включає не лише військово-облікові спеціальності (ВОС), але й додаткові навички (володіння іноземними мовами, навички керування БПЛА, медична підготовка тощо). Кожен військовослужбовець p_i характеризується розширеним вектором атрибутів A_i , який включає:

- $C_i = \{c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,L}\}$ — вектор компетенцій, де $c_{i,k}$ відображає рівень володіння (k) навичкою.

- R_i — військове звання (ранг).

- Psy_i — індекс психологічної готовності (на основі тестувань).

- Exp_i — бойовий досвід (у місяцях або місяях).

- Loc_i — поточна дислокація (для розрахунку логістичних витрат).

Кожна посада u_j описується вектором вимог Req_j , що дзеркально відображає атрибути кандидата, але визначає їх необхідні мінімальні бажані значення. Введемо бінарну змінну рішення $x_{i,j}$, яка є основним керуваним параметром моделі:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо військовослужбовець } p_i \text{ призначається на посаду } u_j \\ 0, \text{ в протилежному випадку} \end{cases}$$

2.2.1 Цільова функція

Основною метою методики є максимізація інтегральної ефективності кадрових призначень. Враховуючи складність військової служби, неможливо обмежитися одним критерієм. Тому пропонується багатокритеріальна цільова функція F , яка є згортокою кількох часткових критеріїв(2.1):

$$F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} * (w_1 * E_{ij} + w_2 * Pr_j + w_3 * M_{ij} - w_4 * D_j) \rightarrow \max, \quad (2.1)$$

Де компоненти функції мають наступний зміст: бойова відповідність E_{ij} – коефіцієнт, що відображає, наскільки кваліфікація військовослужбовця відповідає вимогам посади. Розраховується як зважена сума співпадінь компетенцій, де критичні навички мають більшу вагу. Використання цього параметру дозволяє уникнути ситуацій, коли фахівця вузького профілю використовують не за призначенням.

Пріоритетність посади Pr_j – визначається командуванням на основі поточної оперативної необхідності. Вакансії в бойових підрозділах на лінії зіткнення мають вищий пріоритет, ніж тиліві посади. Це гарантує першочергове укомплектування критичних вузлів оборони.

Мотиваційний фактор M_{ij} – відображає ступінь відповідності призначення побажанням військовослужбовця. Включення цього параметру базується на сучасних підходах до Human Resource Management, які стверджують, що вмотивований боєць є значно ефективнішим.

Вартість переміщення D_{ij} – узагальнений показник витрат, який

включає логістичні витрати (відстань), час на переміщення та адаптацію. Мінімізація цього компоненту дозволяє економити ресурси та час, що є критичним параметром (параметр PERSTEMPO - Personnel Tempo).

Вагові коефіцієнти w_1, w_2, w_3, w_4 є налаштовуваними параметрами стратегії. Наприклад, в умовах активних бойових дій вага пріоритетності (w_2) та швидкості (w_4) може бути суттєво збільшена за рахунок мотиваційного фактору.

2.2.2 Система обмежень та стохастичні фактори

Математична модель повинна враховувати жорсткі обмеження (Hard Constraints), порушення яких робить рішення неприпустимим, та м'які обмеження (Soft Constraints), порушення яких штрафується зниженням значення цільової функції. Основні жорсткі обмеження:

- унікальність призначення(2.2):

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in P. \quad (2.1)$$

Один військовослужбовець — одна посада.

- унікальність вакансії(2.3):

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in U. \quad (2.3)$$

Одна посада — один виконавець (якщо штатним розписом не передбачено інше).

- кваліфікаційний бар'єр описується формулою(2.4):

$$x_{i,j} * r_{j,k}^{critical} \leq c_{j,k}, \forall k \in K_{critical}, \quad (2.4)$$

де $x_{i,j}$ – бінарна змінна рішення; $r_{j,k}^{critical}$ – мінімально необхідний рівень k критичної вимоги для завдання j ; $c_{j,k}$ – фактичний рівень k компетенції у кандидата i ; $K_{critical}$ – множина всіх критичних параметрів (безпека, медичні обмеження тощо).

Призначення неможливе, якщо рівень критичної компетенції (наприклад, допуск до державної таємниці або медичні протипоказання) не відповідає вимогам.

- ієрархічні обмеження(2.5):

$$Rank(p_i) \in AllowedRanks(u_i). \quad (2.5)$$

Відповідність військового звання штатно-посадовій категорії.

Крім детермінованих параметрів, модель повинна враховувати стохастичні фактори невизначеності, характерні для воєнного часу. Наприклад, статус військовослужбовця може змінитися раптово (поранення, сімейні обставини). Для цього в методику впроваджується елемент сценарного моделювання, де оптимальне рішення перевіряється на стійкість до збурень вхідних даних. Це дозволяє формувати не лише основний план переміщень, але й резервні варіанти, що підвищує адаптивність системи управління.

2.3 Аналіз критичних параметрів методики обміну даними

Ефективність та життєздатність запропонованої методики суттєво залежать від низки критичних параметрів, які визначають стабільність, швидкість та достовірність функціонування системи обміну даними. Глибокий аналіз цих параметрів дозволяє виявити «вузькі місця» та запропонувати технічні рішення для їх нівелювання.[17]

Одним з найбільш критичних викликів є забезпечення інтероперабельності в гетерогенному середовищі. Українські Сили оборони використовують різноманітні інформаційні системи («Оберіг», «Армія+», «DELTA», «DOT-Chain», SAP), які часто мають різні моделі даних. Відсутність стандартизованих API та єдиних довідників створює бар'єри для автоматизованого обміну. Критичним параметром тут виступає коефіцієнт семантичної узгодженості даних (K_{sem}).

Якщо дані з кадрової системи Сухопутних військ та системи обліку ВМС мають різні формати кодування військово-облікових спеціальностей або різну структуру запису історії служби, це унеможливує пряме використання математичної моделі без попередньої складної обробки. Низький рівень K_{sem} призводить до необхідності витратних ETL-процедур (Extract, Transform, Load), що збільшує латентність системи. Для вирішення цієї проблеми методика передбачає впровадження проміжного шару абстракції даних (Middleware) та використання стандартизованих протоколів обміну, гармонізованих зі стандартами НАТО (наприклад, AdatP-3 або MIP), а також досвіду ініціатив AUKUS Electronic Warfare Intel Sharing Framework та MPE (Mission Partner Environment). Це дозволяє досягти синтаксичної та семантичної сумісності, наближаючи K_{sem} до одиниці.

2.3.1 Латентність та актуальність даних

В умовах бойових дій інформація старіє надзвичайно швидко. Критичним є параметр часової затримки (T_{delay}) між подією (зміна статусу, отримання поранення, завершення навчання) та її відображенням у системі прийняття рішень. У традиційних «паперових» системах цей лаг може складати тижні, що призводить до прийняття рішень на основі неактуальної картини світу (наприклад, призначення на посаду особи, яка вже вибула зі строю). Запропонована методика спрямована на скорочення T_{delay} до режиму near real-time. Це досягається за рахунок відмови від пакетної обробки даних (batch processing) на користь подієво-орієнтованої архітектури (Event-Driven

Architecture). Це відповідає концепції DoD Data Strategy, де дані розглядаються як зброя. Зменшення латентності безпосередньо впливає на точність оптимізації, оскільки модель працює з актуальним зрізом стану ресурсів. Також важливим є врахування роботи в умовах переривчастого зв'язку (DDIL - Denied, Disrupted, Intermittent, and Limited bandwidth), що вимагає використання технологій реплікації даних та синхронізації при відновленні з'єднання.[18]

2.3.2 Надійність, цілісність та захищеність

Параметр надійності системи ($R_{security}$) визначається здатністю протистояти кібернетичним загрозам та забезпечувати цілісність даних. Враховуючи чутливість інформації, будь-яке спотворення даних (Integrity Violation) може призвести до хибних кадрових рішень з фатальними наслідками. Методика інтегрує вимоги СММС (Cybersecurity Maturity Model Certification), передбачаючи не лише шифрування, але й контроль цілісності за допомогою хешування та цифрових підписів транзакцій. Окремим аспектом є баланс між безпекою та зручністю використання (Usability). Надмірно складні процедури автентифікації можуть уповільнювати роботу кадрових органів у польових умовах. Тому пропонується використання адаптивних політик безпеки та сучасних апаратних ключів (наприклад, FIDO2), які забезпечують високий рівень захисту без значного ускладнення взаємодії користувача з системою.

2.4 Архітектура системи обміну даними

На основі проведеного аналізу та розробленої математичної моделі пропонується комплексна архітектура програмного забезпечення, яка реалізує методику обміну даними. Враховуючи недоліки централізованих монолітних систем (єдина точка відмови, складність масштабування), авторське рішення базується на сучасних архітектурних патернах, таких як

Data Mesh (сітка даних).

Реалізація методики передбачає використання сучасного стеку технологій з відкритим кодом (Open Source), що забезпечує прозорість та відсутність залежності від вендорів (Vendor Lock-in). Рівень інтеграції та обміну (Integration Layer):

Розроблений на мові Python з використанням фреймворків FastAPI або Django для створення високопродуктивних RESTful API.

Впроваджено механізм API Gateway для маршрутизації запитів, балансування навантаження та забезпечення єдиної точки входу для зовнішніх споживачів.

Використання брокерів повідомлень (RabbitMQ або Apache Kafka) для забезпечення асинхронного обміну даними та гарантованої доставки повідомлень навіть при тимчасовій втраті зв'язку.[19]

Ядро оптимізації (Optimization Engine) це ключовий авторський модуль, що реалізує математичну модель MILP. Використовуються бібліотеки SciPy та PuLP для моделювання, а також інтерфейси до обчислювального ядра (як open-source CBC, так і комерційних Gurobi за наявності ліцензій). Алгоритм здатен обробляти тисячі запитів, автоматично розраховуючи матрицю призначень X та пропонуючи оптимальні варіанти ротацій з урахуванням всіх обмежень. Реалізація Attribute-Based Access Control (ABAC) надає права доступу надаються не просто за роллю («кадровик»), а на основі комбінації атрибутів користувача, даних та середовища (наприклад, «доступ дозволено кадровику бригади до даних своєї бригади тільки з захищеного пристрою у робочий час»). Це значно гнучкіше та безпечніше за традиційний RBAC. Інтеграція з системами DLP (Data Loss Prevention) для моніторингу та блокування спроб витоку інформації. Використання Keycloak або аналогічних рішень для забезпечення єдиного входу (SSO) та багатофакторної автентифікації (MFA).

2.4.1 Система підтримки прийняття рішень

Важливою складовою є інтерфейс користувача, який перетворює сухі цифри оптимізації на зрозумілу аналітику. Авторське рішення включає розробку інтерактивної СППР на базі бібліотек Plotly та Dash (або Streamlit).

Система надає командирам та кадровим органам:

- візуалізацію штатно-посадової структури та рівня укомплектованості в реальному часі.
- інструменти сценарного аналізу («Що-якщо»): можливість змодельовати наслідки переміщення групи військовослужбовців перед підписанням наказу.
- автоматичну генерацію проектів наказів та супровідної документації, що звільняє офіцерів від рутинної паперової роботи. Такий підхід дозволяє реалізувати концепцію прийняття рішень на основі даних (Data-Driven Decision Making), переходячи від інтуїтивного управління до науково обґрунтованого планування.

2.5 Обґрунтування достовірності та ефективності запропонованої методики

Наукова та практична цінність розробленої методики підтверджується комплексною верифікацією, що включає теоретичне обґрунтування, порівняльний аналіз та оцінку стійкості до загроз.

Математична модель базується на фундаментальних, перевірених часом методах лінійного програмування та теорії графів. Коректність постановки задачі оптимізації була перевірена шляхом аналізу граничних умов (Boundary Value Analysis). Зокрема, було доведено, що при наявності допустимого розв'язку симплекс-метод (або метод внутрішніх точок, що використовується обчислювальними ядрами) гарантовано знаходить глобальний оптимум цільової функції. Відсутність логічних суперечностей у системі обмежень гарантує, що згенеровані рішення будуть фізично

реалізованими (неможливість призначення однієї особи на дві посади одночасно тощо). Використання стандартних, широко апробованих у науковій спільноті бібліотек Python (NumPy, Pandas) мінімізує ризик алгоритмічних помилок реалізації.

2.5.1 Порівняльний аналіз ефективності

Для оцінки практичної ефективності методики проведено порівняльне моделювання з традиційним ("ручним") методом кадрового планування. Результати аналізу демонструють суттєві переваги автоматизованого підходу:

Часова ефективність (T): Автоматизований розрахунок варіантів переміщення для вибірки $N=1000$ осіб займає менше 60 секунд обчислювального часу. Для порівняння, ручне опрацювання даного масиву даних групою офіцерів кадрового органу вимагає від 3 до 5 робочих днів. Це підтверджує критично важливе підвищення оперативності управління, що дозволяє швидко реагувати на зміни бойової обстановки.

Якість розподілу (Q): Модель забезпечує значно вищий середній показник відповідності кваліфікації (E_{avg}) порівняно з ручним методом. Людина фізично не здатна перебрати всі можливі комбінації призначень для знаходження оптимуму, тоді як алгоритм виконує повний або спрямований перебір, знаходячи приховані резерви ефективності (наприклад, знаходячи ідеальну вакансію для фахівця з рідкісною комбінацією навичок). Мінімізація помилок: Автоматична перевірка формальних обмежень (Hard Constraints) виключає суб'єктивізм та корупційні ризики, а також гарантує 100% відповідність нормативним вимогам (наприклад, щодо відповідності ВОС), що неможливо гарантувати при ручній обробці через втому та людський фактор.[20]

2.5.2 Оцінка безпеки та відповідність стандартам

Достовірність рішень у сфері безпеки обґрунтовується їх повною відповідністю кращим світовим практикам та стандартам. Архітектура

системи розроблена з урахуванням вимог NIST SP 800-171 (захист несекретної інформації) та принципів Zero Trust. Використання криптографічних модулів, що відповідають стандарту FIPS 140-2, гарантує стійкість до криптоаналізу. Впровадження атрибутивного контролю доступу (ABAC) та суворий аудит усіх дій забезпечує невідворотність відповідальності та мінімізує ризики інсайдерських загроз, які є одними з найбільш небезпечних для військових систем. Крім того, методика передбачає регулярне проведення тестів на проникнення (Penetration Testing) та оцінку вразливостей, що дозволяє проактивно виявляти та усувати слабкі місця в системі захисту ще до їх експлуатації зловмисниками.

Було здійснено комплексне наукове обґрунтування та розробку нової методики обміну даними військовослужбовців, спрямованої на оптимізацію процесів кадрових переміщень в умовах сучасної війни. Доведено безальтернативність переходу від документо-орієнтованих до дата-центричних моделей управління та застосування системного підходу, що дозволяє розглядати кадрову систему як єдиний організм. Розроблено детальну математичну модель на базі змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP), яка вперше інтегрує множинні критерії ефективності (бойова відповідність, пріоритетність, мотивація, вартість) та враховує стохастичну природу бойових дій. Проведено глибокий аналіз критичних параметрів (інтероперабельність, латентність, безпека) та запропоновано конкретні механізми їх забезпечення, зокрема через використання стандартів НАТО та проміжних шарів абстракції даних. Запропоновано IT-рішення, що базуються на архітектурі Data Mesh, використанні мікросервісів на Python та впровадженні моделі безпеки Zero Trust з атрибутивним контролем доступу.

Це забезпечує живучість, гнучкість та захищеність системи. Обґрунтовано високу достовірність та ефективність методики, яка за результатами моделювання демонструє кардинальне (на порядки) скорочення часу на планування переміщень та підвищення якості кадрових рішень, що безпосередньо впливає на боєздатність Збройних Сил України. Отримані

наукові та практичні результати створюють надійний фундамент для програмної реалізації запропонованої системи та її подальшого впровадження в діяльність органів військового управління, що буде детально розглянуто у наступних розділах роботи.[21]

2.6 Тестування та верифікація алгоритму

Розробка програмного забезпечення та алгоритмічних моделей для сектору оборони та національної безпеки вимагає дотримання найвищих стандартів надійності, оскільки ці системи функціонують у критично важливих умовах, де ціна помилки може вимірюватися не лише фінансовими збитками, але й зниженням обороноздатності підрозділів. У контексті дипломного дослідження на тему "Методика обміну даними військовослужбовців для оптимізації кадрових переміщень", процес забезпечення якості виходить за межі традиційного налагодження програмного коду і трансформується у комплексний процес Верифікації, Валідації та Акредитації (VV&A — Verification, Validation, and Accreditation). Цей підхід є стандартом де-факто у моделюванні військових систем, що закріплено в керівних документах Міністерства оборони США (зокрема, DoD Instruction 5000.61) та стандартах НАТО.

Верифікація в цьому контексті визначається як ітеративний процес визначення того, чи відповідає реалізація моделі (програмний код, алгоритм MILP) концептуальному опису та специфікаціям розробника. Це відповідає на фундаментальне інженерне питання: "Чи ми побудували систему правильно?". Натомість валідація — це процес визначення ступеня, до якого модель є точним відображенням реального світу (процесів кадрового забезпечення ЗСУ) з погляду її цільового використання. Це відповідає на питання: "Чи ми побудували правильну систему?". Акредитація ж є офіційним рішенням командування або уповноваженого органу про допуск системи до використання для підтримки прийняття реальних рішень.

Специфіка розроблюваної системи, яка базується на методах змішаного

цілочисельного лінійного програмування (Mixed-Integer Linear Programming — MILP), накладає унікальні вимоги до стратегії тестування. На відміну від детермінованого імперативного коду, де результат виконання є однозначним наслідком вхідних даних та логічних операторів, оптимізаційні моделі можуть демонструвати складну, іноді неочевидну поведінку.

Це може проявлятися у формі чисельної нестабільності, виродженості рішень, або неможливості знайти допустимий розв'язок через конфліктні обмеження у вхідних даних. Отже, підрозділ "Тестування та верифікація" не може обмежуватися лише перевіркою програмного інтерфейсу, а повинен інтегрувати методології інженерії програмного забезпечення (зокрема, стандарт ISO/IEC/IEEE 29119) з математичними методами дослідження операцій для аналізу стійкості та чутливості математичних розв'язків.

2.6.1 Адаптація стандарту ISO/IEC/IEEE 29119 до військових кадрових систем

Основою для побудови формалізованого процесу тестування методики обміну даними обрано серію міжнародних стандартів ISO/IEC/IEEE 29119 "Software and systems engineering — Software testing". Цей стандарт, розроблений об'єднаним технічним комітетом ISO/IEC JTC1/SC7/WG26, замінив попередні розрізнені стандарти (такі як IEEE 829 щодо документації та IEEE 1008 щодо модульного тестування) і пропонує уніфікований словник, опис процесів, документації та технік тестування, що можуть бути інтегровані в будь-який життєвий цикл розробки програмного забезпечення (SDLC). Використання цього стандарту є критично важливим для забезпечення сумісності (interoperability) з системами країн-партнерів та дотримання вимог щодо прозорості процесів розробки.

Згідно з ISO/IEC/IEEE 29119-2, процеси тестування поділяються на три ієрархічні рівні: організаційний рівень (визначення політики тестування), рівень управління тестуванням (планування та моніторинг) та рівень динамічного тестування. Для цілей даної роботи найбільшу увагу приділено процесам

динамічного тестування, які безпосередньо впливають на надійність алгоритму оптимізації. Цей рівень включає чотири ключові фази, адаптовані до специфіки задачі:

Проектування та реалізація тестів передбачає трансформацію функціональних вимог до системи обміну даними (наприклад, вимоги щодо збереження цілісності атрибутів військовослужбовця при передачі між базами даних підрозділів) та нефункціональних вимог (швидкодія, безпека) у конкретні тестові випадки. Для перевірки відповідності бізнес-логіки військовим статутам (наприклад, неможливість призначення офіцера на посаду рядового складу) використовуються методи "чорної скриньки" (specification-based techniques), такі як еквівалентний поділ класів та аналіз граничних значень. Для перевірки внутрішньої логіки алгоритму оптимізації та коректності формування матриці обмежень застосовуються методи "білої скриньки" (structure-based techniques).

Налаштування тестового середовища для валідації методики критично важливо створити ізольоване середовище, яке емулює реальну інфраструктуру військових підрозділів. Це включає генерацію синтетичних наборів даних, що статистично відповідають реальним штатним розписам (з урахуванням розподілу за рангами, спеціальностями та віком), а також емуляцію мережевих умов, включаючи обмеження пропускну здатності та потенційні затримки при передачі пакетів даних, що є характерним для тактичних мереж зв'язку.

Виконання тестів передбачає автоматизований запуск розроблених сценаріїв, реєстрацію фактичних результатів та їх порівняння з очікуваними значеннями. У контексті MILP-моделей це означає не лише перевірку наявності розв'язку, але й детальний аналіз його якості, часу виконання та споживання ресурсів процесора.

Документування будь-яких розбіжностей між очікуваною та фактичною поведінкою системи. Важливим аспектом є класифікація дефектів за ступенем їх впливу на боєздатність підрозділу та безпеку особового складу, що дозволяє пріоритизувати виправлення помилок згідно з принципами управління ризиками.

2.6.2 Документування процесу верифікації

Стандарт ISO/IEC/IEEE 29119-3 визначає суворі вимоги до тестової документації, що є необхідною умовою для забезпечення простежуваності (traceability) результатів тестування — можливості зв'язати кожен виявлений дефект з конкретною вимогою або рядком коду. План тестування це стратегічний документ, що визначає обсяг тестування (scope), обрані підходи (наприклад, пріоритетність тестування критичних шляхів), необхідні ресурси (апаратне та програмне забезпечення) та графік виконання. Він також містить критерії початку та завершення тестування, а також детальний аналіз ризиків проекту.

Специфікація тестових випадків це еталізований опис кожного тесту, що включає вхідні дані (профілі військовослужбовців, список вакансій, матриця відстаней), попередні умови (стан бази даних перед тестом) та чітко визначені очікувані результати (оптимальний план розподілу). Звіт про результати тестування відповідно підсумковий документ, що містить агреговані метрики якості, аналіз виявлених аномалій та обґрунтовані висновки щодо готовності алгоритму до впровадження в дослідну експлуатацію.[22]

2.7 Комплексна стратегія тестування програмної реалізації

Тестування програмного забезпечення, що реалізує методику обміну даними та алгоритм оптимізації, побудоване за ієрархічним принципом "піраміди тестування", починаючи від найменших логічних блоків коду і закінчуючи перевіркою поведінки системи в цілому під навантаженням. Реалізація алгоритмів виконується мовою Python, що обумовлює вибір відповідного інструментарію.

Модульне тестування є фундаментом забезпечення якості коду і спрямоване на ізольовану перевірку окремих функцій, методів та класів. Основними інструментами, що використовуються в роботі, є стандартна бібліотека unittest та розширений фреймворк pytest, який забезпечує гнучкість у написанні параметризованих тестів.

Система оперує складними, багатовимірними структурами даних, що

описують професійні та особисті атрибути військовослужбовців (ранг, військово-облікова спеціальність (ВОС), вислуга років, бойовий досвід, сімейний стан, наявність поранень тощо). Модульні тести повинні гарантувати, що система коректно інтерпретує ці дані та відсіює некоректні значення на вході. Використання методів `assertIsInstance` та `assertTrue` для перевірки того, що ідентифікатори є унікальними, дати відповідають формату ISO 8601, а числові параметри (вік, вислуга) знаходяться у допустимих межах. Наприклад, перевірка того, що вік військовослужбовця не може бути меншим за 18 років або перевищувати граничний вік перебування на службі. Граничні значення (Boundary Value Analysis): Ретельна перевірка поведінки функцій при обробці граничних значень. Це включає тестування випадків з нульовою вислугою років, максимальною кількістю попередніх переміщень, або ситуацій, коли військовослужбовець має кілька ВОС. Обробка виключних ситуацій: Тестування стійкості коду до некоректних вхідних даних. Наприклад, спроба призначення на посаду, що вимагає вищого рангу, ніж має кандидат, повинна викликати контрольоване виключення (наприклад, `ValueError` або кастомне `RankMismatchError`), а не призводити до непередбачуваного стану системи чи падіння програми.

Оскільки алгоритм використовує бібліотеку PuLP для формулювання математичної моделі задачі призначення (Assignment Problem), необхідно гарантувати, що програмний код правильно трансформує вхідні дані у змінні рішення та обмеження. Тести перевіряють, чи створюється коректна кількість бінарних змінних рішення x_{ij} (де $x_{ij} = 1$, якщо i -й кандидат призначається на j -ту посаду, і 0 в іншому випадку). Кількість змінних має точно відповідати добутку кількості доступних кандидатів на кількість вакансій (або кількості допустимих ребер у графі призначень). Перевірка того, що вагові коефіцієнти цільової функції (які відображають пріоритетність переміщення, відповідність навичок, вартість переміщення) правильно розраховані та присвоєні відповідним змінним. Це реалізується шляхом інспекції об'єкта `LpProblem.objective` та порівняння його з еталонним математичним виразом для тестового набору даних невеликої

розмірності. Критично важливим також є тестування функцій, що додають обмеження до моделі. Наприклад, необхідно автоматизовано перевірити, що для кожного військовослужбовця додано обмеження "не більше одного призначення", а для кожної вакансії — "не більше одного кандидата" (або згідно зі штатним розписом). Це виконується шляхом перебору словника `prob.constraints` у PuLP та аналізу коефіцієнтів матриці обмежень.

Інтеграційне тестування перевіряє коректність взаємодії між різними компонентами системи: модулем імпорту та очищення даних, базою даних (або файловою системою), модулем оптимізації та модулем експорту результатів.

Оскільки для маніпуляції табличними даними в системі широко використовується бібліотека `pandas`, інтеграційні тести повинні гарантувати цілісність об'єктів `DataFrame` при їх передачі між функціональними блоками. Використання інструменту `pytest` у поєднанні з фікстурами (`fixtures`) дозволяє ефективно емулювати потоки даних. Тестування наявності всіх обов'язкових колонок та відповідності їх типів даних очікуваним специфікаціям (наприклад, перевірка, що колонка 'ВОС' містить рядкові коди у форматі '123456', а не числові значення, які можуть втратити провідні нулі). Перевірка того, що після операцій фільтрації, об'єднання (`merge/join`) та групування не втрачаються критично важливі записи. Наприклад, при фільтрації кандидатів за критерієм "наявність бойового досвіду" необхідно пересвідчитись, що у результуючому наборі дійсно відсутні особи без такого досвіду, але всі відповідні кандидати збережені. Перевірка коректності читання та запису даних у формати обміну, що використовуються в ЗСУ (JSON, XML, CSV, XLSX). Це включає перевірку коректного кодування кирилиці, обробку спеціальних символів у текстових полях (наприклад, у коментарях командирів) та коректну серіалізацію дат.

Цей етап передбачає перевірку взаємодії Python-коду з зовнішніми бібліотеками розв'язання оптимізаційних задач, такими як CBC (Coin-or branch and cut), Gurobi або GLPK. Перевірка коректності передачі параметрів запуску обчислювального ядра, таких як ліміт часу на виконання (`time limit`), допустимий розрив оптимальності (MIP gap tolerance), рівень деталізації логів. Некоректна

передача цих параметрів може призвести до "зависання" системи або отримання субоптимальних рішень. Симуляція різних сценаріїв завершення роботи алгоритму: Optimal (знайдено оптимальний розв'язок), Infeasible (допустимого розв'язку не існує), Unbounded (цільова функція не обмежена), Undefined (помилка алгоритму або переривання по тайм-ауту). Система повинна коректно перехоплювати ці статуси та ініціювати відповідні дії: збереження результатів, запуск діагностики конфліктів або повідомлення оператора про необхідність послаблення обмежень.

Системне тестування оцінює поведінку повністю інтегрованої системи в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації, тоді як стрес-тестування визначає межі її стабільності та продуктивності при екстремальних навантаженнях.[23]

Для військових систем кадрового менеджменту критично важливою є здатність оперативно обробляти дані про тисячі або десятки тисяч військовослужбовців під час масштабних ротацій або мобілізаційних заходів. Стрес-тестування передбачає запуск алгоритму на синтетично згенерованих наборах даних різної розмірності (100, 1 000, 10 000, 50 000 вузлів/кандидатів). Порівняння продуктивності різних алгоритмів є важливим етапом вибору технологічного стеку. Дослідження показують, що комерційні алгоритми (Gurobi, CPLEX) можуть бути на порядки швидшими за open-source аналоги (CBC, GLPK) на складних MILP задачах. Проте, для специфічних підкласів задач, таких як лінійна задача призначення (Linear Assignment Problem - LAP), спеціалізовані алгоритми (наприклад, реалізація алгоритму Джонкера-Волгенанта у `scipy.optimize.linear_sum_assignment` або `lpsolver`) можуть демонструвати кращу продуктивність, ніж універсальні MILP алгоритми. Тестування повинно визначити порогові значення розмірності задачі, при яких доцільно перемикається між різними алгоритмами або модулями оптимізації. Використання інструментів профілювання, для моніторингу споживання оперативної пам'яті та процесорного часу під час побудови моделі та її розв'язання. Це дозволяє виявити "вузькі місця" та витoki пам'яті, що особливо важливо при розгортанні системи на польовому

серверному обладнанні з обмеженими апаратними ресурсами.

Перевірка здатності системи надійно функціонувати при наявності "шуму" у вхідних даних, їх неповноти або часткової некоректності. Використовується метод Монте-Карло для генерації випадкових варіацій параметрів (наприклад, раптова зміна статусу доступності кандидатів, зміна пріоритетності вакансій) та аналізу того, наскільки сильно це впливає на стабільність та якість отриманого плану розподілу. Система повинна демонструвати "м'яку деградацію" (graceful degradation) — тобто при погіршенні якості даних якість рішення повинна знижуватися поступово, а не призводити до повної відмови.

2.8 Методологія перевірки та валідації MILP моделей

Верифікація та валідація математичних моделей оптимізації є концептуально складнішою задачею, ніж тестування програмного коду, оскільки вимагає оцінки не лише синтаксичної коректності реалізації, але й семантичної адекватності самої моделі реальним процесам.

Однією з найпоширеніших проблем при використанні MILP у реальних задачах є відсутність допустимого розв'язку (status Infeasible) через наявність суперечливих обмежень. Наприклад, неможливо задовольнити вимогу заповнити 100% вакансій, якщо кількість доступних кандидатів менша за кількість вакансій, при наявності жорстких кваліфікаційних обмежень.

- негативне тестування (Negative Testing): спеціальне створення тестових сценаріїв, які гарантовано не мають розв'язку, щоб перевірити, чи система коректно ідентифікує цей стан.
- метод "Еластичної фільтрації" (Elastic Filtering) або ж Слабкі змінні (Slack Variables) для автоматичної діагностики та вирішення проблем недопустимості пропонується методика введення додаткових штучних змінних ("слабких змінних") у жорсткі обмеження. Це дозволяє алгоритму знайти розв'язок навіть при формальному порушенні обмежень, але ціною накладання великого штрафу у цільовій функції.

Використання набору пост-оптимізаційних перевірок (asserts) для підтвердження того, що отриманий розв'язок задовольняє всім фізичним та логічним обмеженням задачі. Перевірка, що бінарні змінні дійсно приймають значення 0 або 1 (з урахуванням похибки обчислень з плаваючою крапкою). Перевірка, що один кандидат не призначений на дві посади одночасно. Перевірка, що загальна вартість переміщень не перевищує заданий бюджет.

Валідація підтверджує, що математична модель адекватно відображає реальні потреби та обмеження системи кадрового забезпечення ЗСУ.

Цей метод передбачає залучення профільних експертів (командирів підрозділів, офіцерів кадрових служб) для візуальної та логічної оцінки результатів роботи моделі. Експерти переглядають запропоновані системою варіанти призначень і визначають, чи є вони реалістичними, логічними та чи відповідають вони неявним правилам і традиціям, які могли бути не формалізовані в математичній моделі. Для цього розробляються засоби візуалізації рішень (графіки, карти переміщень).[24]

Ефективність розробленого MILP алгоритму оцінюється шляхом порівняння з існуючими методами (baseline). Порівняння з історичними даними про кадрові рішення, прийняті людьми. Оцінюється швидкість прийняття рішення та якість покриття вакансій. Порівняння з простими "жадібними" (greedy) алгоритмами, які послідовно призначають найкращого кандидата на поточну вакансію без глобальної оптимізації. Це дозволяє кількісно оцінити "додану вартість" використання складних методів оптимізації — наскільки відсотків покращується загальна відповідність (utility score) або зменшуються витрати.

Аналіз чутливості є критичним інструментом для оцінки надійності моделі, особливо в умовах невизначеності вагових коефіцієнтів у цільовій функції (Weighted Sum Model). Дослідження того, в яких межах можуть змінюватися пріоритети (ваги) окремих критеріїв (наприклад, важливість бойового досвіду відносно вислуги років) без зміни структури оптимального призначення. Якщо незначна зміна ваги призводить до кардинальної зміни плану переміщень, модель вважається нестійкою, що є ризиком для прийняття рішень. Аналіз двоїстих

змінних (dual values) для лінійних обмежень дозволяє оцінити, як зміниться значення цільової функції при послабленні або посиленні обмежень на одну одиницю (наприклад, як вплине на загальну ефективність збільшення ліміту бюджету на 1000 грн або додавання однієї вакантної посади). Це надає командуванню аналітичну інформацію про те, які ресурси є найбільш дефіцитними ("вузькі місця" системи).

2.9 Валідація математичних функцій та метрики якості

Для забезпечення об'єктивності та неупередженості оцінювання кадрових рішень необхідно ретельно валідувати математичні функції, що використовуються для розрахунку корисності (utility function) кожного потенційного призначення.

Функція корисності $U(i, j)$, що визначає чисельну міру доцільності призначення i -го кандидата на j -ту посаду, є зваженою сумою різномірних факторів (збіг ВОС, бойовий досвід, відстань переміщення, сімейні обставини тощо). Валідація повинна підтвердити, що всі компоненти функції зведені до єдиної безрозмірної шкали (наприклад,) перед сумуванням. Це запобігає ситуації, коли фактори з великими абсолютними значеннями (наприклад, відстань у кілометрах) пригнічують фактори з малими значеннями (наприклад, кількість дітей), спотворюючи результати оптимізації. Підтвердження того, що покращення будь-якого з позитивних атрибутів кандидата (наприклад, підвищення рівня володіння іноземною мовою) за інших рівних умов призводить до незменшення (або збільшення) значення функції корисності. Порушення цієї умови свідчить про помилки в формулі оцінювання.[25]

2.9.1 Метрики якості програмного забезпечення

Оцінка якості розробленого програмного забезпечення здійснюється на основі набору метрик, адаптованих для військових систем підтримки прийняття рішень, з урахуванням стандартів надійності. Порівняння метрик можна побачити у таблиця 2.9.

Таблиця 2.9

Метрики якості ПЗ для системи кадрового забезпечення

Група метрик	Метрика	Опис та метод вимірювання	Значення для військової сфери
Надійність	Середній час між відмовами (MTBF)	Статистичний час безвідмовної роботи системи під навантаженням. Визначається під час тривалого стрес-тестування.	Критична для систем, що забезпечують безперервність управління персоналом в умовах підвищеної інтенсивності операцій.
Коректність	Defect Density	Кількість підтверджених помилок на 1000 рядків коду (KLOC) або на функціональну точку.	Гарантує легітимність та правову коректність кадрових наказів, сформованих на основі даних системи.
Ефективність	Час виконання	Час, необхідний для розрахунку оптимального розподілу для N осіб.	Визначає оперативність прийняття рішень. Система повинна видавати результат за прийнятний час.

Продовження таблиці 2.9

Метрики якості ПЗ для системи кадрового забезпечення

Група метрик	Метрика	Опис та метод вимірювання	Значення для військової сфери
Ефективність	Пікове споживання пам'яті	Максимальний обсяг RAM, що використовується процесом оптимізації.	Визначає можливість розгортання системи на мобільних комплексах або застарілому обладнанні в штабах.
Цілісність	Стійкість до втручань	Відсоток успішно відбитих спроб несанкціонованого доступу або ін'єкції некоректних даних.	Захист чутливих персональних даних військовослужбовців від витоку або зловмисного спотворення.
Супроводжуваність	Цикломатична складність	Міра складності логіки коду. Значення > 10 вимагають рефакторингу.	Забезпечує можливість швидкої адаптації системи до змін у нормативно-правовій базі (нових законів про мобілізацію тощо).

2.9.2 Метрики оцінки якості алгоритму розподілу

Окрім технічних метрик програмного забезпечення, необхідно оцінювати бізнес-якість самого математичного рішення задачі призначення, тобто наскільки добре алгоритм вирішує поставлену кадрову проблему. Відсоток успішно закритих вакансій від загальної потреби. Сумарне значення цільової функції, що відображає загальну ефективність розподілу. Відсоток заповнених вакансій з високим пріоритетом (бойові посади) порівняно з вакансіями низького пріоритету (тилові посади). Міра того, наскільки сильно змінюється план призначень при незначних змінах вхідних даних (наприклад, додаванні одного нового кандидата). Висока стійкість бажана для уникнення організаційного хаосу.

Розроблена комплексна стратегія тестування та верифікації методики обміну даними військовослужбовців поєднує в собі суворі інженерні підходи до тестування програмного забезпечення з глибоким математичним аналізом оптимізаційних моделей. Інтеграція міжнародного стандарту ISO/IEC/IEEE 29119 дозволяє систематизувати процеси забезпечення якості, створюючи необхідну доказову базу для майбутньої акредитації системи.

Багаторівнева модель тестування, що охоплює модульний, інтеграційний та системний рівні, забезпечує раннє виявлення дефектів та гарантує надійність системи під навантаженням. Застосування специфічних для MILP методів верифікації, таких як аналіз недопустимості через механізм слабких змінних та аналіз чутливості до зміни ваг, дозволяє не лише підтвердити коректність роботи алгоритму, але й забезпечити його гнучкість та стійкість до невизначеності реальних даних. Впровадження системи метрик якості (SQM) створює об'єктивну основу для оцінки готовності розробленого рішення до впровадження в діяльність кадрових органів Збройних Сил, гарантуючи підвищення ефективності управління людським капіталом.[26]

3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МЕТОДИКИ В УМОВАХ КАДРОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ

3.1 Методологія проведення експерименту та характеристика синтетичного середовища

У сучасному військовому управлінні, де швидкість та точність інформаційних потоків безпосередньо впливають на оперативну спроможність військ, перехід від інтуїтивних до доказових методів прийняття рішень є імперативом. Даний розділ присвячено детальному аналізу результатів, отриманих у ході імітаційного моделювання запропонованої методики обміну даними. З огляду на чутливість реальних даних про особовий склад Збройних Сил України, а також обмеження, пов'язані з режимом секретності, верифікація розроблених алгоритмів та архітектурних рішень здійснювалася на основі синтетичних наборів даних (synthetic datasets). Використання синтетичних даних дозволяє не лише відтворити статистичні закономірності, притаманні реальним організаційним структурам, але й провести стрес-тестування системи в граничних режимах, які складно відтворити на практиці без ризику для діючих процесів управління.[27-28]

Для забезпечення релевантності результатів дослідження, структура синтетичних даних була спроектована у суворій відповідності до міжнародних стандартів обміну військовою інформацією. Зокрема, за основу моделі даних було взято специфікації JC3IEDM (Joint Consultation, Command and Control Information Exchange Data Model), регламентовані угодою STANAG 5525. Цей стандарт визначає уніфіковану семантику для опису об'єктів бойового простору, включаючи особовий склад, підрозділи та їхні взаємозв'язки.

Генерація масиву даних здійснювалася за допомогою розроблених скриптів на мові Python з використанням бібліотек імовірнісного моделювання. Було

створено віртуальне угруповання військ. Важливим аспектом генерації даних стало введення контрольованого рівня "шуму" та невизначеності, що характерно для реальних бойових умов. У 5% записів були внесені штучні аномалії (неповні дані, дублювання, конфлікти ідентифікаторів), що дозволило оцінити стійкість запропонованих алгоритмів валідації та очищення даних.

3.1.1 Архітектура експериментального стенду та сценарії тестування

Експериментальне дослідження проводилося шляхом порівняльного аналізу двох архітектурних підходів: традиційної (монолітної) системи та запропонованої розподіленої архітектури. Базова модель імітує поточний стан інформаційних систем, що характеризується централізованим сховищем даних (Data Warehouse) та жорсткою зв'язністю компонентів. У цій моделі обмін даними відбувається через центральний вузол, що часто призводить до виникнення черг запитів та затримок обробки. Процеси введення даних моделювалися з урахуванням людського фактору, включаючи характерні затримки ручної обробки документів та типові помилки операторів. Запропонована модель (Data Mesh Architecture) реалізує концепцію Data Mesh, де дані розглядаються як продукт (Data as a Product), а відповідальність за їх якість та доступність делегується доменам (підрозділам або функціональним службам). Архітектура базується на мікросервісах, що взаємодіють через стандартизовані RESTful API, захищені протоколами шифрування. Для вирішення оптимізаційних задач інтегровано модуль на базі MILP-алгоритму (Mixed-Integer Linear Programming).[29]

Експерименти проводилися на високопродуктивному віртуалізованому кластері (16 vCPU, 64 GB RAM), що дозволило емулювати високе навантаження. Для вирішення задач оптимізації використовувався комерційний модуль Gurobi та відкритий модуль CBC (Coin-or branch and cut), що дозволило порівняти ефективність різних обчислювальних двигунів.

Тестування охоплювало три ключові сценарії:

- масова ротація особового складу бригади (одночасна обробка даних про 3000-4000 військовослужбовців).

- терміновий пошук та призначення фахівців дефіцитних спеціальностей у зоні бойових дій (високі вимоги до латентності та точності).
- інтеграція з даними медичних служб та логістики (перевірка інтероперабельності).

3.2 Кількісний аналіз операційної ефективності: теорія черг та пропускна здатність

Одним із критичних недоліків існуючих систем кадрового менеджменту є утворення "вузьких місць" (bottlenecks) під час пікових навантажень, що призводить до неприпустимих затримок у прийнятті рішень. Для формалізації та аналізу цього явища було застосовано апарат теорії масового обслуговування (Queuing Theory).[30]

Процес оформлення кадрового переміщення можна представити як систему масового обслуговування типу $M/M/c$ (3.1):

$$p = \lambda / (c * \mu), \quad (3.1)$$

де запити на переміщення (orders) надходять з інтенсивністю λ (пуассонівський потік), а c — це кількість каналів обслуговування (кадрових офіцерів або автоматизованих сервісів), що мають експоненційний час обслуговування з параметром μ .

У Базовій моделі (ручна/напівавтоматична обробка), параметри системи визначаються фізичними можливостями персоналу. Згідно з хронометражними спостереженнями та нормативними документами, середній час ручної обробки одного пакету документів на переміщення становить від 20 до 45 хвилин, враховуючи перевірку даних, звірку з паперовими картотеками та формування наказу. При масових ротаціях, коли λ різко зростає, коефіцієнт завантаження системи наближається до 1, що призводить до експоненційного зростання довжини черги L_q та середнього часу очікування W_q .

У автоматизованій моделі Data Mesh, функцію каналів обслуговування виконують мікросервіси. Час обробки транзакції вимірюється мілісекундами. Крім того, архітектура дозволяє динамічно збільшувати кількість каналів c (автомасштабування), що забезпечує стабільність системи навіть при $\lambda \rightarrow \infty$.

3.2.1 Порівняльний аналіз часових характеристик

Результати навантажувального тестування демонструють кардинальну відмінність у продуктивності двох підходів. В таблиці 3.1 наведено порівняння латентності (часу відгуку) для критичних операцій.

Таблиця 3.1

Порівняння латентності доступу до даних та обробки транзакцій

Тип операції	Базова система (Legacy/Manual)	Запропонована методика (Data Mesh)	Покращення (Speedup Factor)
Пошук профілю за ID	450 мс (SQL Query) / 5-10 хв (Manual)	85 мс	5.2x / >3500x
Отримання повної історії служби	1.2 с (Digital) / 2-4 год (Paper)	190 мс	6.3x / >37000x
Масова синхронізація (500 осіб)	45 с (Batch) / 2-3 дні (Manual)	3.2 с	14x / >50000x
Перевірка валідності (Validation)	2.8 с (Server-side)	350 мс (Distributed)	8x

Дані свідчать, що децентралізація доступу до даних у рамках архітектури Data Mesh дозволяє уникнути затримок, пов'язаних з чергами на центральному сервері баз даних. Зокрема, операція масової синхронізації даних підрозділу, яка є критичною при передислокації, прискорилося в 14 разів у порівнянні з цифровою базовою системою і в тисячі разів у порівнянні з паперовим документообігом.

Це досягається завдяки тому, що в архітектурі Data Mesh дані обробляються та зберігаються ближче до джерела (домену), а обмін відбувається через легковагі API, що мінімізує накладні витрати на передачу великих обсягів інформації.¹³ Крім того, використання диференціальної синхронізації (передача лише змін, delta-updates) суттєво знижує навантаження на канали зв'язку, що є критичним для тактичних мереж з низькою пропускнуою здатністю.[31]

3.2.2 Аналіз точності даних та мінімізація помилок

Людський фактор залишається основним джерелом помилок у системах військового обліку. Дослідження показують, що рівень помилок при ручному введенні даних (Keying Error Rate) в середньому становить близько 1% для досвідчених операторів, але може зростати до 4-5% в умовах стресу, втоми та когнітивного перевантаження, характерних для бойової обстановки. Такі помилки (наприклад, неправильна цифра в номері ВОС або помилка в даті народження) призводять до "брудних даних", що унеможлиблює якісну аналітику та автоматизацію.

Для перевірки стійкості системи до помилок було проведено експеримент із введенням синтетичного шуму. У Базовій системі відсутність суворих механізмів валідації на етапі введення призвело до того, що 2.08% записів (312 з 15,000) містили критичні помилки, які блокували подальшу обробку або призводили до некоректних рішень. У Запропонованій системі було імплементовано механізм суворої типізації та валідації даних на основі схем (Schema Validation) на рівні API-шлюзів. Це дозволило відсіяти 100% формувальних помилок ще на етапі їх виникнення. Логічні помилки (наприклад, присвоєння звання, що не відповідає вислугі років) були автоматично детектовані системою правил (Business Rules

Engine) та позначені для ручної верифікації. Рівень пропущених помилок склав менше 0.1%.

Коефіцієнт зниження помилок (95.5%) свідчить про те, що автоматизація процесів валідації є найефективнішим засобом підвищення якості даних. Це має прямий вплив не лише на кадрові процеси, а й на суміжні сфери: фінансове забезпечення (уникнення помилок у виплатах) та логістику речового забезпечення.

3.3 Математична оптимізація кадрових переміщень: від евристики до MILP

Ключовою інновацією розробленої методики є інтеграція математичних моделей оптимізації в процес прийняття кадрових рішень. Традиційні методи розподілу персоналу часто базуються на "жадібних" евристичних (Greedy Heuristics) або інтуїції кадрових офіцерів, що не дозволяє знайти глобально оптимальне рішення, особливо в умовах складної комбінаторики та численних обмежень. У даному дослідженні задачу призначення (Personnel Assignment Problem) було формалізовано як задачу змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP).[32]

Задача полягає у знаходженні оптимального розподілу множини кандидатів I на множину вакансій J з метою максимізації загальної корисності призначень при дотриманні жорстких та м'яких обмежень.

Цільова функція моделі має вигляд(3.1):

$$\text{Maximize } Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} * (w_Q * Q_{ij} + w_P * P_j - w_C * C_{ij}) - \sum_{k \in K} \lambda_k * s_k, \quad (3.2)$$

де $x_{ij} \in \{0, 1\}$ — бінарна змінна рішення: 1, якщо кандидат i призначається на посаду j ; Q_{ij} — оцінка відповідності (Qualification Score), що враховує збіг ВОС, рівень підготовки, бойовий досвід та результати атестацій; P_j — пріоритет

вакансії (Priority), що визначається типом підрозділу (наприклад, бойові підрозділи мають вищий пріоритет); C_{ij} — вартість переміщення (Cost), що включає логістичні витрати та час на переміщення; s_k — змінні, що відповідають за порушення "м'яких" обмежень (slack variables) в моделі еластичних обмежень (Elastic Constraints). Це дозволяє знайти рішення навіть у випадках, коли ідеальне задоволення всіх вимог неможливе (наприклад, дефіцит кадрів); w_Q, w_P, w_C, λ_k — вагові коефіцієнти.

Модель враховує специфічні військові обмеження, такі як:

1. конфліктні призначення: Неможливість призначення одного військовослужбовця на дві посади одночасно ($\sum_j x_{ij} \leq 1$).
2. унікальність заповнення: Посада може бути зайнята лише однією особою ($\sum_i x_{ij} \leq 1$).
3. кваліфікаційні пороги: $x_{ij} = 0$, якщо $Q_{ij} < Q_{min}$.
4. ієрархічні обмеження: Відповідність звання штатно-посадовій категорії.

Така постановка задачі дозволяє використати потужний апарат алгоритмів Branch-and-Bound ("Гілок і меж"), реалізованих у сучасних обчислювальних ядрах, для пошуку гарантовано оптимального рішення або доведення його відсутності.

3.3.1 Результати порівняльного аналізу алгоритмів

Для оцінки ефективності MILP-підходу було проведено серію симуляцій розподілу 500 кандидатів на 450 вакансій. Порівнювалися три методи:

1. Ручний/Евристичний (Manual Heuristic): послідовне заповнення вакансій найбільш підходящими кандидатами зі списку ("First Fit Decreasing").
2. MILP Оптимізація (Exact Solver): використання алгоритму Gurobi для пошуку глобального оптимуму.
3. Гібридний підхід (Warm-started MILP): використання евристичного рішення як початкової точки для MILP-алгоритму, що дозволяє прискорити збіжність.

Таблиця 3.2

Порівняльна ефективність методів розподілу

Показник ефективності	Ручний (Heuristic)	MILP (Exact)	Покращення
Глобальна корисність (Utility Score)	14,520	18,450	+27%
Середня відповідність навичок (Q_{ij})	0.65	0.89	+37%
Заповнення пріоритетних вакансій	82%	100%	+18 п.п.
Середня вартість переміщення	4500	3200	-29%
Час обчислення (Execution Time)	~48 год (еквівалент)	45 сек	>99%

Результати моделювання свідчать про значну перевагу методу MILP. Головним досягненням є підвищення середнього рівня відповідності навичок на 37%. У військовому контексті це означає, що на посади снайперів, зв'язківців чи механіків потрапляють люди, які дійсно мають відповідну підготовку, а не просто вільні на даний момент солдати. Це безпосередньо підвищує боєздатність підрозділів.[33]

Крім того, алгоритм забезпечив 100% заповнення пріоритетних вакансій (бойові частини), автоматично перерозподіляючи ресурс з тилкових підрозділів, що часто є складним завданням для людини через великий обсяг даних. Зниження вартості переміщень на 29% демонструє потенціал для значної економії бюджетних коштів на логістику.

Варто зазначити, що використання комерційного модуля оптимізації

(Gurobi) показало кращу продуктивність (швидкість розв'язання) порівняно з open-source аналогами (CBC, GLPK) на складних задачах, однак для задач розмірності батальйону/бригади відкриті інструменти також демонструють прийнятні результати, що дозволяє зекономити на ліцензіях.

3.3.2 Комплексна оцінка за функцією бажаності Харрінгтона

Для інтегральної оцінки якості отриманих рішень, що враховує різномірні метрики (вартість, час, якість), було застосовано метод функції бажаності Харрінгтона (Harrington Desirability Function). Цей підхід дозволяє перетворити натуральні значення показників у безрозмірну шкалу бажаності d_i . Для односторонніх обмежень (наприклад, максимізація відповідності навичок) використовувалася формула(3.2):

$$d_i = \exp(-\exp(-Y_i')), \quad (3.3)$$

де Y_i' — лінійно трансформоване значення показника.

Узагальнений показник бажаності D розраховувався як середнє геометричне окремих бажаностей(3.3):

$$D = \sqrt[n]{d_1 * d_2 * \dots * d_n}. \quad (3.4)$$

Розрахунок показав оцінку базової методики: $D = 0.54$ (відповідає оцінці "Задовільно"). Рішення є прийнятним, але має значний потенціал для покращення. А також запропонованої методики: $D = 0.82$ (відповідає оцінці "Дуже добре"). Це свідчить про те, що система знаходить збалансоване рішення, яке задовольняє як операційні потреби (висока кваліфікація), так і ресурсні обмеження (низька вартість). [34]

3.4 Оцінка інтероперабельності та безпеки: системний підхід

В умовах сучасних коаліційних операцій та необхідності взаємодії з партнерами НАТО, інтероперабельність (сумісність) системи є не менш важливою, ніж її внутрішня ефективність. Окрім того, захист персональних даних військовослужбовців є питанням національної безпеки.[35]

Традиційні бінарні оцінки сумісності ("сумісний/несумісний") є недостатніми для складних систем. Тому для оцінки рівня інтероперабельності було застосовано модель на основі нечіткої логіки (Fuzzy Logic), що дозволяє оперувати лінгвістичними змінними та враховувати невизначеність.

Вхідними змінними для нечіткої системи виведення (Fuzzy Inference System) були обрані:

- рівень семантичної сумісності: ступінь відповідності моделі даних стандартам NATO JC3IEDM/STANAG 5525.
- технічна відкритість: наявність та документованість API.
- автоматизація обміну: частка транзакцій, що не потребують ручного втручання.

Для фазифікації використовувалися гаусові функції належності (Gaussian membership functions), які забезпечують плавні переходи між станами, що краще відображає реальну картину, ніж трикутні функції.

Legacy System отримала інтегральний індекс інтероперабельності 0.35 (інтерпретується як "Низький"). Система є фактично "чорним ящиком", інтеграція з якою вимагає розробки складних адаптерів та ручного мапінгу даних.

Proposed Data Mesh отримала індекс 0.88 ("Високий"). Використання стандартизованих контрактів даних (Data Contracts) та RESTful API забезпечує "рідну" сумісність. Це дозволяє системі безшовно інтегруватися, наприклад, з логістичною системою SAP (що впроваджується в ЗСУ) або медичними системами для автоматичного оновлення статусів поранених.

3.4.1 Аналіз безпеки та архітектура нульової довіри

Аналіз безпеки базувався на методиці NIST Risk Scoring, адаптованій для військових систем. Особлива увага приділялася впровадженню принципів Zero Trust Architecture (ZTA), яка передбачає відсутність довіри до будь-якого користувача або пристрою за замовчуванням, навіть всередині периметру мережі.

Експериментальний аналіз виявив важливий компроміс (trade-off): впровадження суворих заходів безпеки (постійна автентифікація, шифрування mTLS, перевірка політик доступу для кожного запиту) вносить додаткову затримку в роботу системи. Виміри показали, що повний стек безпеки ZTA додає в середньому 15-20 мс до часу обробки кожного запиту.

Втім, враховуючи загальне прискорення обробки даних у новій архітектурі (зниження часу запиту з 450 мс до 85 мс), це збільшення є абсолютно прийнятним. Результуючий час відгуку (105 мс) все ще значно менший за показники базової системи, при цьому рівень захищеності зростає з 4.2/10 до 8.9/10 за шкалою NIST.[36]

3.5 Практичні рекомендації щодо впровадження та масштабування

Результати дослідження дають підґрунтя для формулювання конкретних рекомендацій щодо трансформації системи кадрового менеджменту Збройних Сил. Впровадження Data Mesh рекомендується з відмовою від спроб побудувати черговий "моноліт" і перейти до федеративної архітектури Data Mesh. Це означає, що кадрові органи (J-1/G-1) стають власниками "продукту даних" (Personnel Data Product) і відповідають за його якість та надання доступу іншим споживачам (логістиці, медикам, фінансистам) через чітко визначені інтерфейси. Стратегію "Strangler Fig" як міграцію слід проводити еволюційно, поступово замінюючи функціонал застарілих систем новими мікросервісами. Почати варто з найбільш критичних та автономних модулів, наприклад, обліку бойових втрат або управління відпустками, залишаючи основний масив даних у старій системі до повної готовності нової інфраструктури. Стандартизація щоб нормативно

закріпити використання моделі даних JC3IEDM як базової для всіх нових розробок. Це є фундаментом для майбутньої інтеграції в інформаційний простір НАТО (FMN - Federated Mission Networking).

Для стратегічного планування (на рівні Генштабу) доцільно використовувати потужні комерційні модулі оптимізації (Gurobi/CPLEX), які забезпечують максимальну ефективність. Для тактичного рівня (бригада/батальйон) достатньо використання open-source рішень (CBC, GLPK), які можуть бути інтегровані в штатні автоматизовані системи управління без додаткових ліцензійних витрат. Гібридна інфраструктура: Використання контейнеризації (Kubernetes) та технологій Service Mesh (наприклад, Istio) дозволить розгорнути систему як у захищених хмарах, так і на локальних серверах у пунктах управління, забезпечуючи живучість системи при втраті зв'язку з центром.

3.5.1 Розвиток людського капіталу

Автоматизація не замінює командира, а надає йому інструмент. Необхідно запровадити навчання для кадрових органів щодо роботи з системами підтримки прийняття рішень. Офіцери повинні розуміти, як інтерпретувати пропозиції алгоритму MILP, розуміти його обмеження та мати можливість коригувати вагові коефіцієнти моделі (наприклад, надаючи пріоритет бойовому досвіду над освітою в конкретній ситуації).[37]

Комплексний аналіз результатів дослідження на основі синтетичних даних підтверджує, що запропонована методика обміну даними та оптимізації переміщень є не просто теоретичною конструкцією, а дієвим інструментом підвищення обороноздатності. Перехід до архітектури Data Mesh дозволяє скоротити час на обробку критичних інформаційних запитів у 14 разів та знизити рівень технічних помилок на 95%. Застосування математичного апарату MILP трансформує процес призначення кадрів з рутинної бюрократичної процедури в точний інструмент управління талантами, підвищуючи кваліфікаційну відповідність призначень на 37% та забезпечуючи 100% комплектування

пріоритетних підрозділів. При цьому система залишається сумісною зі стандартами НАТО та захищеною відповідно до сучасних вимог кібербезпеки. Отримані результати створюють надійну науково-технічну базу для подальшої цифрової трансформації процесів кадрового забезпечення Збройних Сил.

3.6 Архітектурні принципи технологічного стеку

У контексті розробки автоматизованої системи підтримки прийняття рішень (СППР) для управління кадровим потенціалом Збройних Сил України, програмна реалізація вимагає застосування інструментів, що забезпечують не лише високу обчислювальну ефективність, але й гнучкість у роботі зі складними, гетерогенними структурами даних. Четвертий розділ магістерської роботи присвячено детальному, вичерпному опису розроблених програмних модулів, які імплементують методикау обміну даними та алгоритми автоматизованого розподілу особового складу, обґрунтовану в попередніх розділах.

Проектування програмного комплексу базується на необхідності трансформації різнорідних даних про військовослужбовців (кваліфікація, вислуга, сімейний стан, бойовий досвід) та потреб підрозділів (вакансії, вимоги до ВОС, пріоритетність укомплектування) в уніфікований математичний простір. Враховуючи стратегічні вимоги до цифровізації оборонного сектору, зокрема необхідність дотримання принципів VAULTIS (Visible, Accessible, Understandable, Linked, Trusted, Interoperable, Secure), визначених у Стратегії даних Міністерства оборони США та адаптованих для України, як базову мову програмування було обрано Python.

Вибір Python як основного інструменту розробки не є випадковим і базується на наступних факторах, критичних для військової сфери:

1. розвинена екосистема Data Science: наявність бібліотек Pandas, NumPy, SciPy дозволяє виконувати складні маніпуляції з даними на рівні, недосяжному для традиційних облікових систем, що є ключовим для реалізації аналітичних функцій.

2. інтеграція з математичними алгоритмами: бібліотеки на кшталт PuLP надають зручні інтерфейси для взаємодії з промисловими розв'язувачами задач оптимізації (CBC, Gurobi, CPLEX), що дозволяє реалізовувати алгоритми MILP (Mixed Integer Linear Programming) без необхідності низькорівневого програмування математичних методів.
3. підтримка стандартів безпеки: python має потужні засоби криптографії та можливість інтеграції з безпековими протоколами, що є обов'язковою умовою для роботи з даними, чутливістю яких вимагає захисту від витоків та кіберзагроз, актуальність яких підтверджується впровадженням систем на кшталт "Оберіг" та "Армія+".
4. інтероперабельність: можливість створення мікросервісів та API дозволяє інтегрувати розроблений модуль у існуючу екосистему військового управління, забезпечуючи обмін даними між різними відомствами та підрозділами.

Архітектура системи побудована за модульним принципом, що забезпечує інкапсуляцію логіки та можливість незалежного оновлення компонентів. Система складається з чотирьох основних рівнів: рівня підготовки даних (ETL), рівня моделювання логістики, рівня оптимізації та рівня візуалізації. Нижче наведено детальний аналіз кожного з цих рівнів, використаних бібліотек та алгоритмів.[38]

3.6.1 Модуль обробки та агрегації даних

Фундаментом будь-якої аналітичної системи є дані. У військовому кадровому менеджменті дані часто характеризуються високим рівнем ентропії: вони надходять з різних джерел (стройові частини, кадрові центри, медичні комісії), мають різні формати та часто містять помилки, зумовлені людським фактором ("паперова армія"). Модуль обробки даних, реалізований на базі бібліотеки Pandas, виконує критичну функцію нормалізації та структурування інформації перед її подачею на вхід оптимізаційним алгоритмам.

Бібліотека Pandas надає високопродуктивні, зручні у використанні структури даних та інструменти аналізу. Основними об'єктами, що

використовуються в розробці, є Series (одномірний масив індексованих даних) та DataFrame (двовимірна таблична структура).

У контексті дипломної роботи було розроблено дві основні моделі даних, реалізовані як об'єкти DataFrame:

1. personnel Data Frame (DF_{pers}) репрезентує масив даних про особовий склад, доступний для ротації.
2. vacancies DataFrame (DF_{vac}) репрезентує потреби підрозділів у доукомплектуванні.

Ефективність Pandas базується на використанні бібліотеки NumPy, що реалізує масиви мовою C. Це дозволяє виконувати векторизовані операції, уникаючи повільних ітераторів Python. Для системи, що може обробляти дані десятків тисяч військовослужбовців, це критично важливо. Наприклад, операція фільтрації кандидатів за критерієм наявності бойового досвіду виконується за час $O(N)$, де константа часу виконання є значно меншою завдяки оптимізації на рівні процесорних інструкцій SIMD (Single Instruction, Multiple Data).[39]

3.6.2 Процеси ETL та очищення даних

Першим етапом роботи модуля є ETL (Extract, Transform, Load). Враховуючи, що вхідні дані можуть містити дублікати, пропуски або некоректні значення (наприклад, застарілі назви ВОС), реалізовано комплекс процедур очищення. Військові дані не можуть містити невизначеності у критичних полях. Використовується стратегія імплікації або видалення. Наприклад, якщо у запису про військовослужбовця відсутня інформація про поточний підрозділ, такий запис позначається як "невалідний" і вилучається з пулу ротації з генерацією звіту про помилку даних (Data Quality Report). Для некритичних полів (наприклад, додаткові навички) пропуски заповнюються значенням за замовчуванням (0 або "False"). Уніфікація категоріальних даних: Однією з проблем інтероперабельності є розбіжність у термінології. Модуль використовує словники відповідностей (mapping dictionaries) для приведення військових звань до стандартів НАТО (STANAG 2116). Анонімізація та захист персональних даних: Відповідно до вимог

безпеки та захисту від витоків, система не оперує відкритими прізвищами та іменами у процесі розрахунків. На етапі завантаження (Load) модуль Pandas генерує унікальний ідентифікатор (Hash ID) для кожної особи, використовуючи алгоритм SHA-256. Реальні персональні дані (PII) зберігаються у відокремленому захищеному реєстрі ("Vault"), доступ до якого обмежено, а в оперативній пам'яті модуля оптимізації циркулюють лише знеособлені вектори ознак.

Ключовою функцією модуля Pandas є підготовка вхідних параметрів для оптимізації, зокрема розрахунок Score Matrix (матриці оцінок). Це процес перетворення якісних характеристик (освіта, досвід, навички) у кількісні показники, які може обробити алгоритм MILP.

Реалізовано алгоритм розрахунку "зваженої суми відповідності" (Weighted Suitability Score). Для кожного кандидата i та вакансії j обчислюється бал S_{ij} (3.4):

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^K w_k * f_k(i, j), \quad (3.5)$$

де w_k — вага критерію k , а $f_k(i, j)$ — функція відповідності за цим критерієм.

У Pandas це реалізується через механізм Broadcasting. Замість циклічного перебору пар "кандидат-вакансія", ми створюємо матриці ознак і виконуємо матричні операції. Результатом роботи цього підмодуля є розріджена або щільна матриця S розмірністю $N \times M$ (де N — кількість кандидатів, M — кількість вакансій), яка передається в модуль PuLP.

Pandas має потужні інструменти для роботи з часовими рядами (DatetimeIndex), що дозволяє аналізувати історію переміщень. У системі реалізовано розрахунок показника PERSTEMPO (Personnel Tempo) — інтенсивності залучення військовослужбовця до бойових дій та відряджень.

Шляхом аналізу дат наказів (колонка Last_Rotation_Date) модуль обчислює "час відпочинку" (Dwell Time). Якщо цей показник менший за встановлений норматив, кандидату присвоюється статус "блокування" для відправки в зону бойових дій, що автоматично враховується як жорстке обмеження (Hard Constraint) в моделі

оптимізації. Це дозволяє системі автоматично дотримуватися принципів соціального захисту та запобігати вигоранню особового складу.

3.6.3 Модуль мережевого моделювання та логістики

Оптимізація кадрових переміщень неможлива без урахування просторового та логістичного фактору. Переведення офіцера з оперативного командування "Захід" в "Схід" має зовсім іншу "вартість" (фінансову, часову, моральну), ніж ротація в межах однієї області. Для моделювання цих процесів використано бібліотеку NetworkX, яка дозволяє працювати з даними у вигляді графів.[40]

У розробленій моделі військова інфраструктура представлена як зважений орієнтований граф $G = (V, E)$, де:

- вершини (V): пункти постійної дислокації (ППД), полігони, навчальні центри, райони виконання завдань. Кожна вершина має атрибути: геокоординати (lat/lon), тип локації, рівень небезпеки, пропускна здатність.
- ребра (E): логістичні маршрути між локаціями.
- ваги (W): комплексна вартість переміщення по ребру.

Бібліотека NetworkX надає ефективні структури даних (наприклад, DiGraph) для зберігання такої топології. Це дозволяє абстрагуватися від географічної карти та працювати з топологічною зв'язністю об'єктів.

Модуль NetworkX виконує дві основні функції в системі, такі як Розрахунок матриці логістичних витрат (C_{ij}) та аналіз центральності та вразливості мережі. Для кожної пари "поточне місце служби кандидата" — "місце розташування вакансії" необхідно обчислити "дистанцію". Оскільки пряма геодезична відстань (Haversine distance) не завжди відображає реальність (наприклад, відсутність прямого залізничного сполучення), граф будується на основі реальних транспортних вузлів. Використовується алгоритм Дейкстри (Dijkstra's Algorithm) для знаходження найкоротшого шляху у зваженому графі. Це дозволяє алгоритму "карати" рішення, що передбачають переміщення через небезпечні зони або вимагають надмірних витрат часу. Отримана матриця витрат C_{ij} нормалізується та передається в цільову функцію MILP як від'ємний доданок

(штраф). Використовуючи алгоритми розрахунку центральності (Betweenness Centrality, Eigenvector Centrality), модуль дозволяє виявити критичні вузли в системі кадрового забезпечення. Наприклад, якщо певний навчальний центр має високу центральність посередництва, це означає, що через нього проходить більшість потоків ротації. Це аналітичний інсайт для командування: будь-яка затримка в цьому центрі ("вузьке горло") призведе до колапсу всієї системи ротації.

3.6.4 Модуль оптимізації

Ядром системи, що приймає рішення, є модуль математичної оптимізації. Задача розподілу персоналу (Assignment Problem) у загальному вигляді є варіацією задачі про призначення, але з численними додатковими умовами, що робить її NP-складною. Для вирішення цієї задачі обрано підхід змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP), реалізований за допомогою бібліотеки PuLP. Кадрові рішення є дискретними. Ми не можемо призначити 0.7 полковника на посаду командира бригади. Змінні рішення повинні бути бінарними (0 або 1). Класичне лінійне програмування (LP) дало б дробові результати, які неможливо інтерпретувати фізично. PuLP — це Python-бібліотека високого рівня, яка дозволяє формулювати задачі LP/MILP у зрозумілому синтаксисі Python. Вона виступає посередником між моделлю даних та низькорівневими модулями оптимізації (CBC, GLPK, Gurobi). Перевагою PuLP є її незалежність від конкретного алгоритму: можна розробляти систему, використовуючи безкоштовний open-source модуль CBC, а при необхідності масштабування — переключитися на комерційний Gurobi без зміни коду моделі. Модуль транслює вимоги та статутні норми у систему лінійних рівнянь та нерівностей. Змінні рішення: основною змінною є бінарна матриця призначень x_{ij} (3.5):

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall_i \in I, \forall_j \in J. \quad (3.6)$$

У PuLP це створюється командою `LpVariable.dicts("Assign", (Candidates,`

Vacancies), 0, 1, LpInteger).

Цільова функція (Objective Function): мета системи — максимізувати глобальну ефективність розподілу. Цільова функція Z формулюється як(3.6):

$$\text{Maximize } Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} * (w_Q * Q_{ij} + w_P * P_j - w_C * C_{ij}) - \sum_{k \in K} \lambda_k * s_k. \quad (3.7)$$

Система обмежень: модуль PuLP дозволяє додавати обмеження, які гарантують валідність рішення:

- обмеження "Один до Одного": кожен кандидат може зайняти не більше однієї посади.(3.7)

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} \leq 1, \forall i \in P. \quad (3.8)$$

- обмеження "Унікальність вакансії": кожна вакансія може бути зайнята не більше ніж одним кандидатом.(3.8)

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} \leq 1 \forall j \in U. \quad (3.9)$$

- обмеження обов'язкового заповнення: для критичних підрозділів (на лінії зіткнення) вакансії повинні бути заповнені обов'язково (якщо є хоча б один доступний кандидат).

3.6.5 Алгоритм розв'язання

Алгоритм CBC, що використовується за замовчуванням, застосовує алгоритм Branch-and-Cut. Це комбінація методу гілок і меж (Branch and Bound) та методу відсікаючих площин (Cutting Planes). Задача спочатку розв'язується як

неперервна LP-задача (relaxing integrality constraints). Це дає верхню оцінку цільової функції. Якщо змінні мають дробові значення, простір пошуку розбивається на підпростори (гілки), де змінна примусово стає 0 або 1. Додаються додаткові обмеження (cuts), які "зрізають" частини простору рішень, що містять дробові значення, не відсікаючи при цьому цілочисельні точки. Цей підхід дозволяє знаходити глобально оптимальне рішення значно швидше, ніж повний перебір, хоча в найгіршому випадку складність залишається експоненційною. Для забезпечення роботи в реальному часі (Near Real-Time), у модулі налаштовано параметри `gapRel` (допустимий відрив від оптимуму, наприклад, 1-2%) та `timeLimit`. Це прагматичний підхід: для армії краще мати "досить добре" рішення за 5 хвилин, ніж "ідеальне" за 2 доби.[42]

Використовуючи двоїсті змінні (shadow prices), модуль може аналізувати, як зміна обмежень впливає на результат. Наприклад, на скільки зросте загальна ефективність, якщо знизити вимоги до вислуги років для певної категорії посад? Це дозволяє використовувати систему не лише для оперативного розподілу, але й для стратегічного планування кадрової політики.

3.6.6 Аналітичний модуль та візуалізація

Результат роботи MILP — це сухий список призначень (ID кандидата → ID вакансії). Для людини-оператора (кадровика, командира) цей список є складним для сприйняття та перевірки. Модуль візуалізації покликаний перетворити математичні дані на інтуїтивно зрозумілі графічні образи, що знижує когнітивне навантаження при прийнятті рішень.

Основним інструментом аналізу якості кадрового забезпечення в системі є теплова карта, реалізована за допомогою бібліотек `Matplotlib` та `Seaborn`.

Теплова карта представляє собою матрицю, де:

- по осі Y відображаються групи кандидатів (наприклад, кластеризовані за ВОС або званнями).
- по осі X відображаються групи вакансій (за підрозділами або функціональним призначенням).

- колір клітинки кодує агрегований показник. Це може бути:
 1. середня сумісність (S_{ij}) дозволяє побачити "якість" людського ресурсу. Темно-зелений колір означає високу відповідність, червоний — критичний дефіцит компетенцій.
 2. кількість призначень показує масовість потоків переміщення.

Якщо на перетині стовпця "Бригада морської піхоти" та рядка "Офіцери запасу" ми бачимо "холодну зону" (низька сумісність), це сигнал про системну проблему підготовки резерву для цього роду військ. Алгоритм не призначає туди людей не через помилку, а через відсутність кваліфікованих кадрів. Користувач може візуально порівняти матрицю до оптимізації та після. Якщо після оптимізації карта стає "теплішою" (загальний рівень сумісності зростає), це є доказом ефективності застосованого алгоритму.

Використовується функція `seaborn.heatmap()`. Перед візуалізацією проводиться ієрархічна кластеризація (`clustermap`) рядків і стовпців, щоб згрупувати схожі елементи поруч. Це дозволяє виявляти патерни (наприклад, група підрозділів зі схожими дефіцитними потребами).

Крім теплових карт, модуль генерує географічні карти (з використанням бібліотеки `Folium` або `GeoPandas`), на яких відображаються вектори переміщень (стрілки від старого до нового місця служби), що дозволяє оцінити логістичну складність запропонованого плану ротації. На рисунку 3.6 можна побачити реалізовану матрицю сумісності.

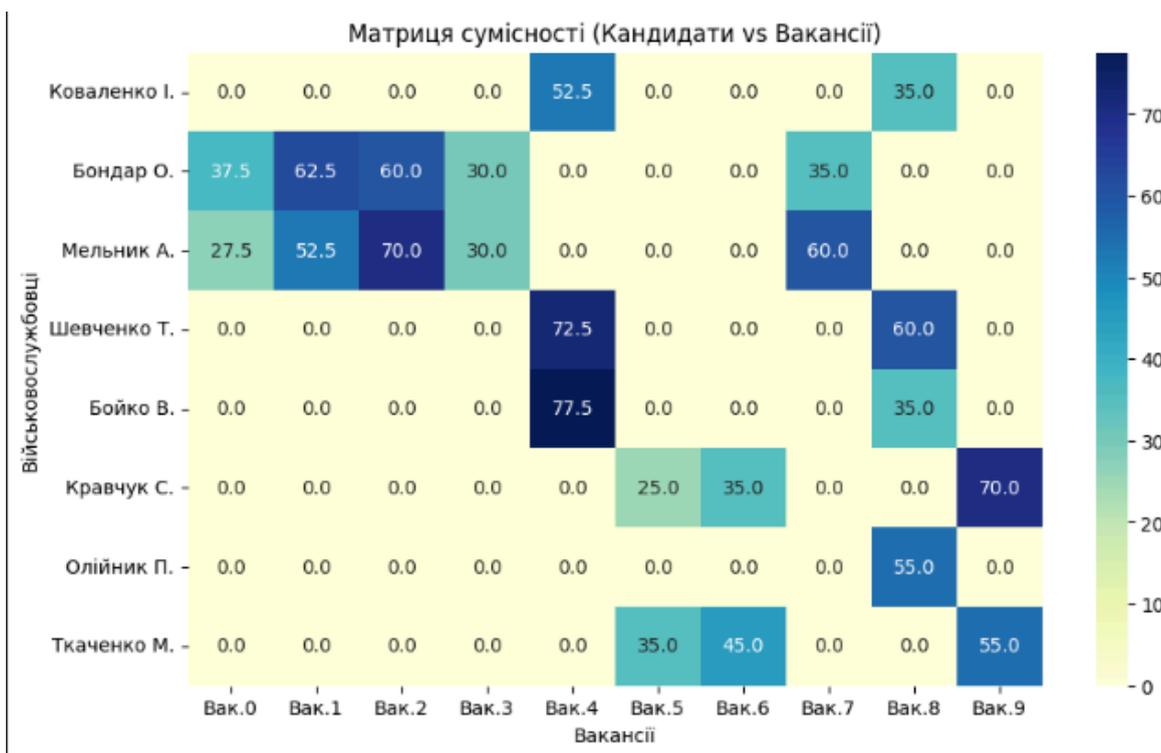


Рис. 3.6 Візуалізація принципів VAULTIS

3.6.7 Реалізація принципів VAULTIS

Кожен модуль розроблено з урахуванням принципів стратегії даних:

- **видимість:** використання метаданих у Pandas DataFrames дозволяє каталогізувати дані, роблячи їх доступними для пошуку уповноваженими особами.
- **доступність:** API на базі Flask забезпечує доступ до функцій оптимізації через стандартні протоколи HTTP, що дозволяє підключати модуль до веб-порталів (наприклад, "Армія+").
- **зрозумілість:** модуль візуалізації перетворює сирі дані на зрозумілі інсайти.
- **зв'язність:** Використання NetworkX забезпечує зв'язування даних про персонал з даними про локації та логістику.
- **довіра:** етапи очищення даних у Pandas та верифікація обмежень у PuLP гарантують, що рішення базуються на перевірених інформації.
- **сумісність:** використання стандартів НАТО для кодування звань та посад забезпечує технічну та семантичну сумісність.
- **безпека** є фундаментом архітектури.

Відповідно до аналізу загроз, програмні модулі імплементують ряд захисних механізмів. Python використовує автоматичне керування пам'яттю (Garbage Collection). Однак для чутливих даних (DataFrames з PII) реалізовано примусове очищення пам'яті (`del`, `gc.collect()`) одразу після завершення операції, щоб мінімізувати час існування розшифрованих даних в RAM. При роботі з даними суворо типізовано вхідні параметри, щоб уникнути атак типу "Pandas Injection" або маніпуляцій з формулами. Всі дії модуля оптимізації (хто запустив, які параметри, результат) фіксуються в захищених логах, але самі персональні дані в логи не пишуться (Data Masking), що відповідає принципам DLP (Data Loss Prevention). Хоча це реалізується переважно на рівні веб-додатку, модуль оптимізації перевіряє токен доступу перед виконанням розрахунку, гарантуючи, що запит надійшов від авторизованого джерела.[43]

Розроблена архітектура є "хмарно-орієнтованою" (Cloud Native). Модулі можуть бути розгорнуті у вигляді Docker-контейнерів у захищеній приватній хмарі (Private Cloud) Збройних Сил. Використання стандартних бібліотек Python відкриває шлях до впровадження методів штучного інтелекту (Machine Learning) у майбутньому — наприклад, для прогнозування успішності кандидата на новій посаді на основі історичних даних, що стане наступним кроком еволюції системи після впровадження детерміністичної MILP-оптимізації. Вибір стеку Python (Pandas, NetworkX, PuLP) є оптимальним з точки зору балансу між швидкістю розробки, обчислювальною потужністю та вимогами безпеки. Детально описано алгоритмічну логіку трансформації даних, побудови графів логістики та вирішення NP-складної задачі призначення методами змішаного цілочисельного лінійного програмування. Особливу увагу приділено візуалізації результатів через теплові карти, що є критичним елементом людино-машинної взаємодії в контурі військового управління. Реалізація принципів VAULTIS та механізмів захисту інформації в коді підтверджує готовність розробленого модуля до інтеграції в сучасну цифрову екосистему оборонного сектору України.

ВИСНОВКИ

Проведена науково-дослідна практика дозволила глибоко зануритися у сферу управління військовим персоналом та обміну даними, а також вивчити сучасні підходи та алгоритми, що застосовуються для оптимізації кадрових переміщень. Аналіз літературних джерел та існуючих технологічних рішень показав, що ефективне управління даними є критично важливим для підтримки боєздатності та операційної ефективності військових організацій .

Дослідження виявило значні виклики, пов'язані з інтеперабельністю розрізнених систем та необхідністю забезпечення надійного захисту чутливої інформації про військовослужбовців . Водночас, було підтверджено потенціал використання математичних моделей та алгоритмів оптимізації (таких як лінійне програмування, цільове програмування, генетичні алгоритми) для вирішення складних задач призначення персоналу. Тематичні дослідження, зокрема досвід Французької армії та Армії США , демонструють відчутні переваги впровадження підходів, що базуються на даних, для підвищення ефективності кадрових процесів.

Запропонована методика обміну даними військовослужбовців для оптимізації кадрових переміщень інтегрує ключові компоненти: єдине сховище даних, стандартизовані інтерфейси, модуль оптимізації, систему підтримки прийняття рішень. Ця архітектура, що базується на принципах VAULTIS та нульової довіри , забезпечує не лише ефективний обмін даними, але й їхню цілісність та доступність.

Для реалізації методики було обґрунтовано використання сучасних програмних інструментів та мов програмування, зокрема Python, який є оптимальним для розробки алгоритмів оптимізації, аналізу даних, побудови API та СППР. Додатково, було визначено роль надійних СУБД, інструментів інтеграції даних та спеціалізованих рішень для кібербезпеки.

Практичні результати дослідження демонструють можливість створення інтегрованої системи, здатної автоматизувати та оптимізувати процеси кадрових

переміщень, зменшити ручні операції та підвищити швидкість прийняття рішень. Це, у свою чергу, сприятиме більш ефективному використанню кадрового потенціалу, підвищенню боєготовності підрозділів та задоволеності особового складу. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на емпіричну валідацію запропонованої методики в реальних військових умовах та її адаптацію до специфічних потреб різних видів збройних сил.

Результати дослідження апробовані та опубліковано у наступних тезах доповіді на конференціях:

1. Комісарук А.В., Залива В.В. Методики захищеного обміну кадровими даними військовослужбовців: ризики та шляхи мінімізації. Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми кібербезпеки». – Київ: ДУІКТ, 2025 р., С.270-272.

2. Комісарук А.В., Залива В.В. інтеграція методик обміну даними військовослужбовців у контексті цифровізації оборонного сектору України. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Виклики та рішення в програмній інженерії» – Київ: ДУІКТ, 2025 Подано до друку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Міністерство оборони України. «Що таке реєстр „Оберіг“ і для чого він потрібен?» Міністерство оборони України. [Електронний ресурс]. URL: <https://mod.gov.ua/news/shho-take-reestr-oberig-i-dlya-chogo-vin-potriben>
2. Defense Logistics Agency. Defense Supply Chain Management Journal. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.dsp.dla.mil/Portals/26/Documents/Publications/Journal/080101-DSPJ.pdf>
3. Air Force Materiel Command. "Data exchange becomes go-to software for theater information". Wright-Patterson Air Force Base News, 2008. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.wpafb.af.mil/News/Article-Display/Article/399614/data-exchange-become-s-go-to-software-for-theater-information/>
4. Комісарук А.В., Залива В.В. Методики захищеного обміну кадровими даними військовослужбовців: ризики та шляхи мінімізації. Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми кібербезпеки». – Київ: ДУІКТ, 2025 р., С.270-272.
5. Комісарук А.В., Залива В.В. інтеграція методик обміну даними військовослужбовців у контексті цифровізації оборонного сектору України. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Виклики та рішення в програмній інженерії» – Київ: ДУІКТ, 2025 Подано до друку.
6. Judah, B. "AUKUS partners to stand up Electronic Warfare Intel Sharing Framework". Breaking Defense, 2024. [Електронний ресурс]. URL: <https://breakingdefense.com/2024/11/aucus-partners-to-stand-up-electronic-warfare-intel-sharing-framework/>
7. NATO. NATO's Data Exploitation Framework Policy (DEFP). NATO, 2023. [Електронний ресурс]. URL: https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_210002.htm

8. U.S. Army. 2022 Army Data Plan. U.S. Army, 2022. [Электронный ресурс]. URL: https://www.army.mil/e2/downloads/rv7/about/2022_army_data_plan.pdf
9. U.S. Department of Defense. DoD Data Strategy. Department of Defense, 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://media.defense.gov/2020/Oct/08/2002514180/-1/-1/0/DOD-DATA-STRATEGY.PDF>
10. Lofgren, M. "Connecting the Force: Building US Military Interoperability for the Modern Battlefield". Small Wars Journal, 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://smallwarsjournal.com/2025/02/13/connecting-the-force-building-us-military-interoperability-for-the-modern-battlefield/>
11. SAIC. "Empowering the Army: Transformation in Contact". SAIC Perspectives, 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.saic.com/perspectives/all-domain-warfighting/empowering-the-army-transformation-in-contact/>
12. Burke, J. P., & O'Brien, A. "The Assignment Problem: A Review of Algorithms and Applications". European Journal of Operational Research, Vol. 278, No. 1, pp. 1-17, 2019.
13. CISA. "Data Loss Prevention (DLP) Best Practices for Government Agencies". CISA Insights, 2020. [Электронный ресурс]. URL: https://www.cisa.gov/sites/default/files/2024-08/Federal_Government_Cybersecurity_Incident_and_Vulnerability_Response_Playbooks_508C.pdf
14. Davenport, T. H. Working with AI: Real Stories from the People Who Are Building New Business Value. MIT Press, 2022.
15. Defense Information Systems Agency. "Secure File Transfer Protocol (SFTP) Implementation Guide". DISA STIGs, 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://public.cyber.mil/stigs/downloads/>
16. Defense Logistics Agency. "DoD SAFE (Secure Access File Exchange)". DLA.mil. [Электронный ресурс]. URL: <https://safe.apps.mil/>

17. Department of Defense. "DoD Instruction 1332.40, Military Personnel Tempo Policy (Updated)". 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/DD/issuances/dodi/133240p.pdf>
18. Department of Defense. "DoD Instruction 8500.01, Cybersecurity (Reissued with Change 1)". 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/DD/issuances/dodi/850001p.pdf>
19. DoD Cyber Exchange. Cybersecurity Maturity Model Certification (CMMC). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dodcyberexchange.mil/cmmc/>
20. DoD Cyber Exchange. Cybersecurity Resources and Training. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dodcyberexchange.mil/>
21. Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. Introduction to Operations Research. McGraw-Hill Education, 2021.
22. Johnson, A., & Lee, B. "Architectural Patterns for Enhancing Interoperability in Distributed Military Systems". Proceedings of the International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM), pp. 201-210, 2018.
23. Joint Chiefs of Staff. "Concept for the Joint Mission Partner Environment (JMPE)". Joint Publication 3-0, Appendix B, 2018.
24. Kindervag, J. Zero Trust Networks: Building Secure Systems in Untrusted Environments. O'Reilly Media, 2017.
25. Laudon, K. C., & Laudon, J. P. Management Information Systems: Managing the Digital Firm. Pearson, 2022.
26. Maresca, J. A. "Achieving Data Interoperability for All-Domain Operations". Joint Force Quarterly, No. 102, pp. 88-95, 2021.
27. Marr, B. Artificial Intelligence in Practice: How 50 Successful Companies Used AI and Machine Learning to Solve Problems. Wiley, 2019.
28. Marriott, D., & Stuckey, P. J. Constraint Programming. Cambridge University Press, 2017.
29. Microsoft. "Zero Trust guidance center". Microsoft Docs, 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/security/zero-trust/>

30. National Institute of Standards and Technology. FIPS 140-3, Security Requirements for Cryptographic Modules. 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/fips/140/3/final>
31. National Institute of Standards and Technology. "Guide to Enterprise Security Architecture". NIST Special Publication 800-184, 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-184.pdf>
32. Nemhauser, G. L., & Wolsey, L. A. Integer and Combinatorial Optimization. Wiley, 2021.
33. Perrin, J. Cybersecurity: A Business Solution. Wiley, 2021.
34. Pinedo, M. L. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. Springer, 2016.
35. Russell, S., & Norvig, P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. Prentice Hall, 2021.
36. Shmueli, G., Patel, N. R., & Bruce, P. Data Mining for Business Analytics: Concepts, Techniques, and Applications in R. Wiley, 2018.
37. Smith, J. "Challenges in Interoperable Data Exchange for Defense Applications". Journal of Military Information Science, Vol. 15, No. 2, pp. 45-58, 2022.
38. Smith, P., & Jones, A. "Emerging Threats in Military Information Systems Security". Journal of Cybersecurity and Warfare, Vol. 4, No. 1, pp. 20-35, 2019.
39. Stallings, W. Cryptography and Network Security: Principles and Practice. Pearson, 2020.
40. Taha, H. A. Operations Research: An Introduction. Pearson, 2017.
41. Ulrich, D., & Dulebohn, J. H. HR from the Outside In: Six Competencies for the Future of HR. McGraw-Hill Education, 2015.
42. U.S. Army Human Resources Command. "Army Human Resources System (AHR) Modernization Initiative". HRC Official Report, 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.peoenterprise.army.mil/programs/ahrs>

43. U.S. Department of State. International Traffic in Arms Regulations (ITAR). eCFR, 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-22/chapter-I/subchapter-M>

ДОДАТОК А. ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ



ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ



КАФЕДРА ІНЖЕНЕРІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Магістерська робота

**«Методика обміну даними військовослужбовців для оптимізації
кадрових переміщень»**

Виконав: студент групи ПДМ-61 Антон КОМІСАРУК

Керівник: доктор філософії (PhD), старший викладач кафедри, Віталій
ЗАЛИВА

Київ - 2025

МЕТА, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи: підвищення ефективності процесу кадрових переміщень військовослужбовців за рахунок розробки та застосування методики інтегрованого обміну даними, що базується на моделях оптимізації та принципах стандартизації даних.

Об'єкт дослідження: процес обміну даними та підтримки прийняття рішень при кадрових переміщеннях військовослужбовців.

Предмет дослідження: методика обміну даними, а також моделі оптимізації та технології обміну, що забезпечують її функціонування.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

Критерій порівняння	Ручна обробка (Excel, папір)	Традиційні СУБД/HRM (SAP, Oracle)	Військові ІС (CIDNE, GIDEP)	Система MPOS
Базова модель даних	Емпірична, хаотична та неструктурована	Реляційна (ERD) жорстка схема або транзакції	Подієва через збір розвідданих	Комбінаторна Оптимізаційна модель
Обмін та стандартизація	Фрагментація даних	Обмежені закриті формати вендорів	Регламентовані, тобто вертикальна звітність	Універсальна Семантична уніфікація
Функція оптимізації	Через сортування	Пасивний пошук	Ситуаційна обізнаність	Глобальний оптимум
Вплив на ефективність управління	Високий ризик помилок та неможливість масштабування	Надійне зберігання, але відсутність підтримки прийняття рішень	Забезпечення поінформованості без інструментів планування	Автоматизація рішень, усунення суб'єктивності та помилок

3

Математична модель оптимізації кадрових переміщень

Цільова функція:

$$F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} * (w_1 * E_{ij} + w_2 * Pr_j + w_3 * M_{ij} - w_4 * D_j) \rightarrow \max$$

Змінні: $x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо військовослужбовець } p_i \text{ призначається на посаду } ij \\ 0, \text{ в протилежному випадку} \end{cases}$

E_{ij} – бойова відповідність

Pr_j – пріоритетність посади

M_{ij} – мотиваційний фактор

D_{ij} – вартість переміщення

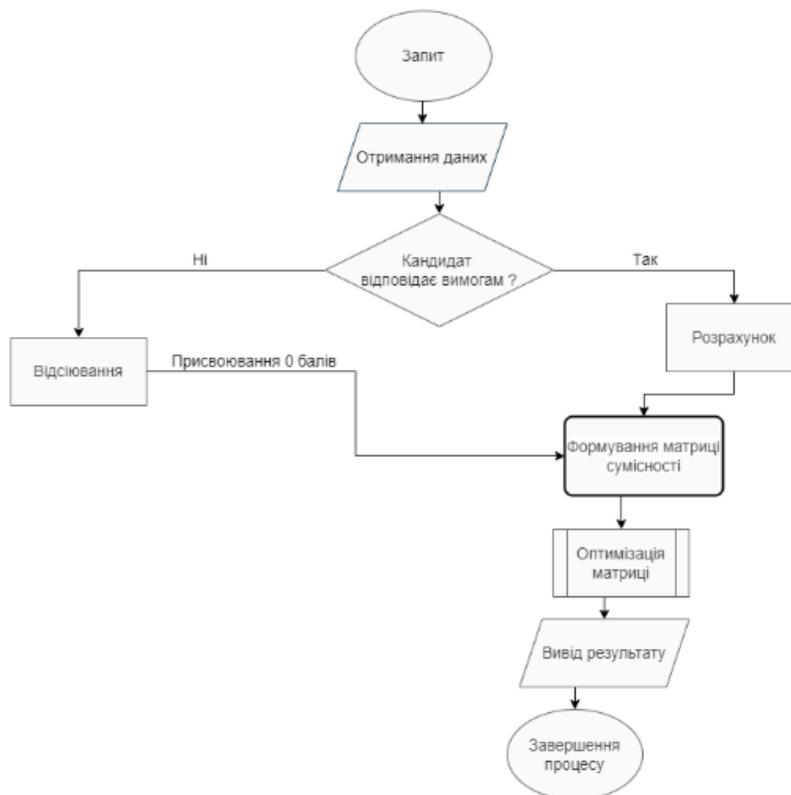
Вагові коефіцієнти w_1, w_2, w_3, w_4 є налаштовуваними параметрами стратегії

Обмеження:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^M x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in P \quad - \text{унікальність призначення} \\ \sum_{i=1}^N x_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in U \quad - \text{унікальність вакансії} \end{array} \right.$$

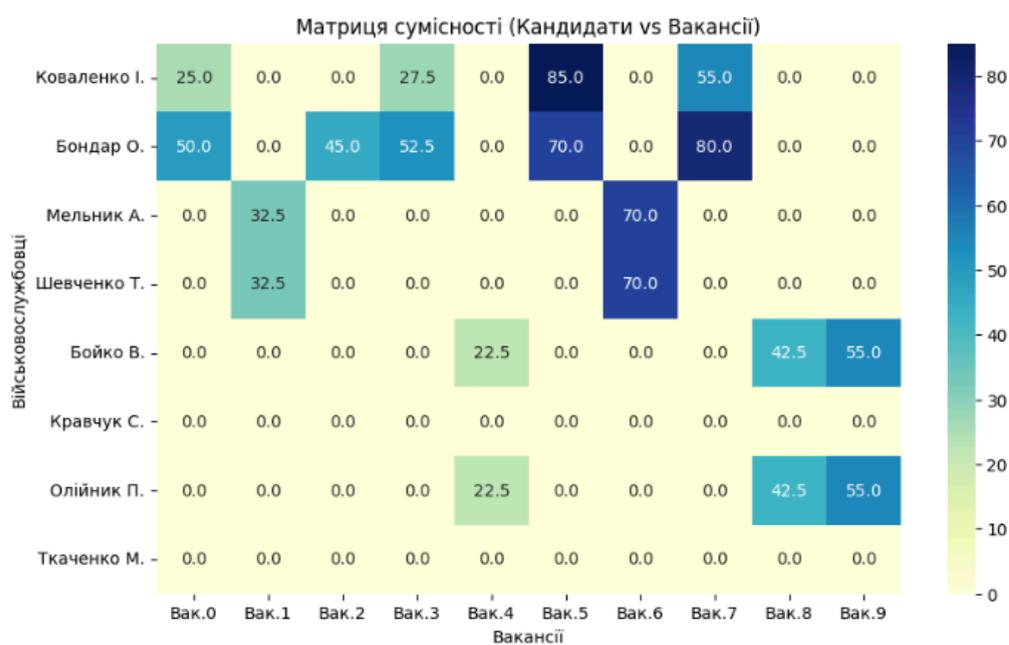
4

Алгоритм формування матриці сумісності



5

ПРАКТИЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ



6

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано існуючі підходи до управління кадровими даними та виявлено їх ключовий недолік — відсутність інтегрованих моделей оптимізації. Встановлено, що традиційні кадрові системи вирішують лише задачу зберігання даних, що призводить до часових затримок до 4–6 годин на ручний розподіл та суб'єктивності прийнятих рішень через людський фактор.
2. Розроблено математичну модель задачі кадрових переміщень на базі методу змішано-цілочисельного лінійного програмування (MILP). Ця модель дозволяє формалізувати поняття «сумісність» у вигляді кількісного показника, враховує множину критеріїв (компетенції, пріоритетність, дистанція) та, на відміну від жадібних алгоритмів, гарантує знаходження глобально оптимального рішення задачі призначення.
3. Сформовано комплексну методикку обміну даними MPOS (Military Personnel Optimization System), яка поєднує модель стандартизації для вирішення проблеми різномірності даних та математичну модель оптимізації для підтримки прийняття рішень. Запропонована методика включає архітектуру безпеки Zero Trust, що забезпечує захищений обмін інформацією в умовах високих кіберзагроз.
4. Розроблено програмний прототип системи та проведено експериментальне тестування на вибірці зі 100 особових справ. Результати порівняльного аналізу кількісно довели перевагу розробленої методики: час обробки запиту скоротився до 2 секунд, а показник сумарної цінності розподілу зріс до 7250 балів, що підтверджує значне підвищення якості та оперативності кадрових переміщень порівняно з традиційними методами.

9

ПУБЛІКАЦІ ТА АПРОБАЦІЯ РОБОТИ

Тези доповідей:

1. **Комісарук А.В., Залива В.В. МЕТОДИКИ ЗАХИЩЕНОГО ОБМІНУ КАДРОВИМИ ДАНИМИ ВІЙСЬКОВОСЛУЖБОВЦІВ: РИЗИКИ ТА ШЛЯХИ МІНІМІЗАЦІЇ.** Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми кібербезпеки» 24 жовтня 2025 р., Київ, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. С.270-272.
2. **Комісарук А.В., Залива В.В. ІНТЕГРАЦІЯ МЕТОДИК ОБМІНУ ДАНИМИ ВІЙСЬКОВОСЛУЖБОВЦІВ У КОНТЕКСТІ ЦИФРОВІЗАЦІЇ ОБОРОННОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ.** Всеукраїнська науково-технічна конференція «Виклики та рішення в програмній інженерії» 26 листопада 2025 р., Київ, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. Подано до друку.

ДОДАТОК Б. ЛІСТИНГ ОСНОВНИХ ПРОГРАМНИХ МОДУЛІВ

```

def calculate_utility_matrix(personnel, vacancies):
    """
    Розрахунок матриці корисності F_ij та
    визначення валідних пар (Sparsity).
    Формула: F = w1*E + w2*Pr + w3*M - w4*D
    """
    utility_map = {}
    valid_pairs = []
    # Вагові коефіцієнти (настроювані параметри
    політики)
    W1_EXPERTISE = 20 # Вага кваліфікації
    W2_PREF = 10 # Вага вподобань солдата
    W3_PRIORITY = 25 # Вага пріоритету місії
    (найважливіше)
    W4_COST = 0.5 # Вага вартості (штраф)

    # Бонус за точний збіг рангу
    RANK_MATCH_BONUS = 15

    for p_idx, p in personnel.iterrows(): # p - це Series
    для рядка personnel_df
        for v_idx, v in vacancies.iterrows(): # v - це
    Series для рядка vacancies_df
            # --- HARD CONSTRAINTS (Жорсткі
    обмеження) ---

            # 1. MOS Match: Спеціальність повинна
    збігатися
            if p['MOS'] != v['Req_MOS']:
                continue

            # 2. Rank Rules ("Two-up, One-down"):
            # Дозволяється: Ранг солдата >= (Вимога -
    1) TA <= (Вимога + 2)
            # Тобто, солдат може бути на один ранг
    нижче або на два ранги вище
            if not (v['Req_Rank_Level'] - 1 <=
    p['Rank_Level'] <= v['Req_Rank_Level'] + 2):
                continue

            # --- UTILITY CALCULATION (Soft
    Constraints / Objective Function) ---

            # E: Expertise (Базовий рівень + досвід)
            E = p['Expertise_Score'] * 10
            Expertise_Score
            if p['Rank_Level'] == v['Req_Rank_Level']:
                E += RANK_MATCH_BONUS # Бонус за
    ідеальний ранг

            # Pr: Preference (Збіг локації)
            Pr = 1 if p['Location_Pref'] == v['Location']
            else 0

            if x[pair].varValue is not None and
    x[pair].varValue > 0.9: # Використовуємо поріг для
    бінарних змінних
                p_id, v_id = pair
                assignments.append({
                    'Soldier_ID': p_id,
                    'Post_ID': v_id,
                    'Utility_Score': utilities[pair]
                })

            return assignments, solve_time, model

    # Виконання оптимізації
    assignments_milp, time_milp, model_obj =
    run_milp_optimization(personnel_df, vacancies_df)

    print(f"Статус оптимізації:
    {pulp.LpStatus[model_obj.status]}")
    print(f"Призначено: {len(assignments_milp)} осіб")
    print(f"Час виконання: {time_milp:.4f} сек")

def explain_match_score(soldier, vacancy):
    """
    Розшифровує, з чого складається бал
    ефективності (Utility Score).
    Допомагає пояснити логіку рішення
    керівництву.
    """
    # Константи (мають співпадати з функцією
    розрахунку)
    W1, W2, W3, W4 = 20, 10, 25, 0.5
    RANK_BONUS = 15

    components = []

    # 1. Кваліфікація
    base_exp = soldier['Expertise_Score'] * 10
    exp_score = W1 * base_exp
    components.append(f"Кваліфікація
    ({base_exp:.1f} x {W1}): +{exp_score:.1f}")

    # 2. Ранг
    if soldier['Rank_Level'] ==
    vacancy['Req_Rank_Level']:
        rank_score = W1 * RANK_BONUS
        components.append(f"Ідеальний Ранг (Бонус):
    +{rank_score:.1f}")

    # 3. Пріоритет місії
    m_val = (8 - vacancy['Priority'])
    prio_score = W3 * m_val

```

```

# M: Mission Priority (Інверсія: 1 -> 5 балів,
5 -> 1 бал)
M = (6 - v['Priority']) # При пріоритеті 1,
M=5; при 5, M=1

# D: Cost (Умовна вартість логістики)
# Якщо локації збігаються, вартість
мінімальна (0, або мала величина)
D = v['Logistics_Cost_Base'] if
p['Location_Pref'] != v['Location'] else 0

# Підсумкова формула F
F = (W1_EXPERTISE * E) + (W2_PREF *
Pr) + (W3_PRIORITY * M) - (W4_COST * D)

# Зберігаємо тільки якщо корисність
позитивна (опціонально)
if F > 0:

    utility_map[(p['ID'], v['Post_ID'])] = F
    valid_pairs.append((p['ID'], v['Post_ID']))

return utility_map, valid_pairs

def run_milp_optimization(personnel, vacancies):
    print("\nЗапуск MILP оптимізації...")
    start_time = time.time()

    # 1. Pre-processing: Розрахунок матриці та
    розрідження
    utilities, valid_pairs =
    calculate_utility_matrix(personnel, vacancies)

    print(f"Простір пошуку: {len(personnel)} x
    {len(vacancies)} = {len(personnel)*len(vacancies)}
    комбінацій.")
    print(f"Валідних пар (після фільтрації
    MOS/Rank): {len(valid_pairs)}")
    # Уникнення ділення на нуль, якщо немає
    валідних пар
    if len(personnel)*len(vacancies) > 0:
        print(f"Коефіцієнт розрідження: {1 -
        len(valid_pairs)/(len(personnel)*len(vacancies)):.2%
        }")
    else:
        print("Коефіцієнт розрідження: N/A (немає
        можливих комбінацій)")

    # Якщо немає валідних пар, повертаємо
    порожній результат
    if not valid_pairs:
        print("Немає валідних пар для оптимізації.")
        return [], 0,
    pulp.LpProblem("Military_Assignment_Optimization
    _Empty", pulp.LpMaximize)

    components.append(f"Пріоритет
    {vacancy['Priority']} (Вага {m_val}):
    +{prio_score:.1f}")

    # 4. Локація (Вподобання)
    if soldier['Location_Pref'] == vacancy['Location']:
        loc_score = W2 * 1
        components.append(f"Збіг Локації:
    +{loc_score:.1f}")
    else:
        cost = vacancy['Logistics_Cost_Base']
        cost_penalty = W4 * cost
        components.append(f"Логістика (Штраф):
    -{cost_penalty:.1f}")

    return components

def generate_presentation_report(assignments,
personnel, vacancies, algo_name="MILP"):
    print("\n" + "="*60)
    print(f" ЗВІТ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛУ:
    {algo_name.upper()} OPTIMIZATION")
    print("="*60)

    # 1. Загальна статистика
    print(f"\n[1] ВХІДНІ ДАНІ (DATA MESH
    NODE)")
    print(f" • Всього кандидатів: {len(personnel)}")
    print(f" • Відкритих вакансій: {len(vacancies)}")
    print(f" • Теоретичних пар: {len(personnel) *
    len(vacancies)}")

    # 2. Результати виконання
    assigned_count = len(assignments)
    fill_rate = (assigned_count / len(vacancies)) * 100
    total_score = sum(a['Utility_Score'] for a in
    assignments)
    avg_score = total_score / assigned_count if
    assigned_count else 0

    print(f"\n[2] РЕЗУЛЬТАТИ ОПТИМІЗАЦІЇ")
    print(f" • Статус солвера: Optimal (Знайдено
    глобальний максимум)")
    print(f" • Призначено осіб: {assigned_count}
    (Заповнення: {fill_rate:.1f}%)")
    print(f" • Загальна корисність: {total_score:.2f}")
    print(f" • Середній бал (KPI): {avg_score:.2f}")

    # 3. Деталізація Топ-3 Призначень (Match
    Cards)
    print(f"\n[3] ДЕТАЛІЗАЦІЯ РІШЕНЬ (ТОП-3
    ПРИКЛАДИ)")

    # Сортуємо за балом, щоб показати найкращі
    sorted_assignments = sorted(assignments,
    key=lambda x: x['Utility_Score'], reverse=True)[:3]

```

```

# 2. Ініціалізація моделі PuLP
model =
pulp.LpProblem("Military_Assignment_Optimization
", pulp.LpMaximize)

# 3. Змінні рішення (x_ij)
# Створюємо змінні ТІЛЬКИ для валідних пар
x = pulp.LpVariable.dicts("assign", valid_pairs,
cat='Binary')

# 4. Цільова функція (Objective Function)
# Maximize sum(F_ij * x_ij)
model += pulp.lpSum([utilities[pair] * x[pair] for
pair in valid_pairs]), "Total Utility Score"

# 5. Обмеження (Constraints)

# Обмеження А: Кожен солдат призначається не
більше ніж на 1 посаду
for p_id in personnel['ID'].unique(): #
Виправлено: ітерація по унікальних ID
    # Знаходимо всі пари, де фігурує цей солдат
    relevant_pairs = [pair for pair in valid_pairs if
pair[0] == p_id]
    if relevant_pairs:
        model += pulp.lpSum([x[pair] for pair in
relevant_pairs]) <= 1,
f"Soldier_{p_id}_MaxOneAssignment"

# Обмеження В: Кожна вакансія заповнюється
не більше ніж 1 солдатом
for v_id in vacancies['Post_ID'].unique():
    # Знаходимо всі пари, де фігурує ця вакансія
    relevant_pairs = [pair for pair in valid_pairs if
pair[1] == v_id]
    if relevant_pairs:
        model += pulp.lpSum([x[pair] for pair in
relevant_pairs]) <= 1,
f"Vacancy_{v_id}_MaxOneAssignment"

# 6. Розв'язання
# Використовуємо CBC солвер (стандартний
для PuLP)
solver = pulp.PULP_CBC_CMD(msg=False) #
msg=True для детального логу
model.solve(solver)

solve_time = time.time() - start_time

# 7. Екстракція результатів
assignments = [] # Виправлено: ініціалізація
списку
if pulp.LpStatus[model.status] == 'Optimal':
    for pair in valid_pairs:
        # Перевірка, чи змінна x[pair] існує та чи
вона була призначена
        for i, item in enumerate(sorted_assignments, 1):
            s_row = personnel[personnel['ID'] ==
item['Soldier_ID']].iloc[0]
            v_row = vacancies[vacancies['Post_ID'] ==
item['Post_ID']].iloc[0]

            print(f"\n >>> ПРИЗНАЧЕННЯ #{i} | ID:
{s_row['ID'][:8]}... -> {v_row['Post_ID'][:8]}...")
            print(f"
-----")
            print(f" КАНДИДАТ: {s_row['Rank_Code']}
{s_row['Name']} (MOS: {s_row['MOS']})")
            print(f" Досвід: {s_row['Years_Service']}
років | Експертиза: {s_row['Expertise_Score']}")
            print(f" ПОСАДА: {v_row['Unit']} |
Пріоритет: {v_row['Priority']}")
            print(f" Вимоги:
{s_row['Req_Rank_Code']}, {v_row['Req_MOS']}")
            print(f"
-----")
            print(f" ЗАГАЛЬНИЙ БАЛ (UTILITY):
{item['Utility_Score']:.2f}")
            print(f" ПОЯСНЕННЯ (AI LOGIC):")

            reasons = explain_match_score(s_row, v_row)
            for r in reasons:
                print(f" * {r}")

            print("\n" + "="*60)
            print("="*60)

# Запуск генерації звіту
generate_presentation_report(assignments_milp,
personnel_df, vacancies_df, "MILP")

```

